

N° D'ORDRE :

760.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES, PHYSIQUES,

PAR M. HENRI ABRAHAM,

Ancien Élève de l'École Normale Supérieure.

1^{re} THÈSE. — SUR UNE NOUVELLE DÉTERMINATION DU RAPPORT ϵ ENTRE LES UNITÉS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET ÉLECTROSTATIQUES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le ³⁰ juin 1892, devant la Commission d'examen.

MM. LIPPMANN, *Président.*

BOUTY, } *Examineurs.*
JOLY, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1892

N° D'ORDRE :

760.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. HENRI ABRAHAM,

Ancien Élève de l'École Normale Supérieure.

1^{re} THÈSE. — SUR UNE NOUVELLE DÉTERMINATION DU RAPPORT ϕ ENTRE LES UNITÉS
ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET ÉLECTROSTATIQUES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 30 juin 1892, devant la Commission d'examen.

MM. LIPPMANN, *Président*.

BOUTY, }
JOLY, } *Examineurs*.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1892

ACADÉMIE DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
DOYEN	DARBOUX, Professeur.....	Géométrie supérieure.
PROFESSEURS HONORAIRES {	PASTEUR.	
	DUCHARTRE.	
	DE LACAZE-DUTHIERS....	Zoologie, Anatomie, Physio- logie comparée.
	HERMITE.....	Algèbre supérieure.
	TROOST.....	Chimie.
	FRIEDEL.....	Chimie organique.
	O. BONNET.....	Astronomie.
	TISSERAND.....	Astronomie.
	LIPPMANN.....	Physique.
	HAUTEFEUILLE.....	Minéralogie.
	BOUTY.....	Physique.
	APPELL.....	Mécanique rationnelle.
	DUCLAUX.....	Chimie biologique.
PROFESSEURS	BOUSSINESQ.....	Mécanique physique et expé- rimentale.
	PICARD.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	POINCARÉ.....	Calcul des probabilités, Phy- sique mathématique.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physio- logie comparée.
	BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	DITTE.....	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS.....	Géologie
	GIARD.....	Évolution des êtres organisés.
	WOLF.....	Physique céleste.
PROFESSEURS ADJOINTS	CHATIN.....	Zoologie, Anatomie, Physio- logie comparée.
	JOLY.....	Chimie.
SECRÉTAIRE	PHILIPPON.	

A LA MÉMOIRE

DE

MES GRANDS-PARENTS.

A

MM. JULES VIOLLE ET MARCEL BRILLOUIN,

MAITRES DE CONFÉRENCES A L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE.

Hommage de respectueux attachement.

H. ABRAHAM.

PREMIÈRE THÈSE.

SUR UNE

NOUVELLE DÉTERMINATION DU RAPPORT ν

ENTRE LES

UNITÉS C.G.S. ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET ÉLECTROSTATIQUES.

AVANT-PROPOS.

Le présent travail a pour objet une détermination du rapport ν entre les unités C.G.S. électromagnétiques et électrostatiques.

Je rappelle, dans l'INTRODUCTION, la définition de ces deux systèmes d'unités, en vue d'arriver à la signification précise de ν .

La PREMIÈRE PARTIE contient l'exposé historique des travaux antérieurs. Tout en insistant davantage sur les expériences faites par la méthode que j'ai cru devoir adopter moi-même, j'ai toujours cherché à faire ressortir le degré de précision qu'avaient comporté ces mesures, tel qu'il est donné par l'étude des Mémoires originaux.

La SECONDE PARTIE renferme le détail de mes propres recherches.

INTRODUCTION.

§ 1. — *Les systèmes d'unités.*

Les lois de nombres de la Physique ne sont souvent que des lois de proportionnalité; nous en faisons des lois d'égalité par l'introduction de coefficients numériques, et la valeur de ces coefficients dépend des unités employées. On choisit ces unités de manière à simplifier autant que possible les formules : on cherche à rendre égaux à 1 les coefficients des formules les plus employées. Un système d'unités constitué de cette manière est dit *absolu* et les unités elles-mêmes sont des unités *absolues* ou *normales*.

Il est clair qu'il reste une large part à l'arbitraire dans la fixation des unités normales, puisqu'on est libre de simplifier une formule au lieu d'une autre. S'il s'agit des mesures de surfaces, par exemple, on pourra choisir une unité telle que la surface du cercle de rayon 1 soit mesurée par le nombre 1 ou par un autre nombre, 17, je suppose, ou encore, comme on le fait, par le nombre $\pi = 3,141592 \dots$, ce qui peut paraître compliqué, mais est assez simple pourtant, parce que l'on simplifie ainsi notablement les calculs relatifs au rectangle et au triangle.

Les unités normales sont donc, pour ainsi dire, arbitraires, et les systèmes absolus d'unités en nombre illimité.

Nous faisons toutes nos réserves pour ce qui est des *dimensions* des grandeurs; nous n'avons pas à nous en occuper ici, et nous dirons, dans un autre travail, qu'il n'y a lieu de considérer *qu'un seul* système de dimensions.

Outre l'énergie W , les principales grandeurs électriques et magnétiques sont :

Q la quantité d'électricité,
 E la chute de potentiel et la force électromotrice,
 C la capacité d'un condensateur,
 I l'intensité d'un courant,
 R la résistance d'un conducteur,
 $\mathfrak{M}$ la quantité de matière magnétique fictive.

La majorité des physiciens considèrent comme capitales les lois expérimentales, d'ailleurs indépendantes du milieu ambiant, qu'expriment les relations

(le signe $::$ se lira proportionnel à)

$$Q :: It; \quad W :: EQ; \quad Q :: CE; \quad E :: IR; \quad W :: \mathfrak{M} I.$$

En adoptant cette manière de voir, il faudra choisir des unités électriques qui rendent correctes, sans coefficients numériques, les équations fondamentales

$$Q = It; \quad W = EQ; \quad Q = CE; \quad E = IR.$$

Comme cinquième condition, on préfère prendre, avec Maxwell,

$$W = 4\pi \mathfrak{M} I$$

pour expression du travail dépensé pendant la rotation de la masse magnétique $\mathfrak{M}$ autour du courant I.

Nous le répétons, le peu d'expériences que l'on possède à ce sujet semblent indiquer que ces cinq équations restent vraies dans tous les milieux.

A ces égalités ils faut joindre celles des actions électriques, magnétiques et électrodynamiques

$$F = \frac{QQ'}{k r^2}, \quad F = \frac{\mathfrak{M} \mathfrak{M}'}{\mu r^2}, \quad F = \mu' \frac{II' ds ds'}{r^2} (\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta'),$$

k, μ, μ' étant des coefficients qui dépendent de la nature du milieu.

Ces trois coefficients ne sont pas indépendants et l'expérience ⁽¹⁾ montre que

$$\mu' = 2\mu.$$

Nous avons dit qu'on pouvait, en général, choisir librement les unités absolues. Mais, avec la restriction imposée de n'introduire aucun coefficient numérique dans les équations que nous considérons en électricité comme fondamentales, il ne reste plus d'arbitraire, en dehors des unités de longueur, de masse et de temps, que l'une des unités des grandeurs $Q, I, E, R, C, \mathfrak{M}$.

Il y a deux systèmes C.G.S. d'unités absolues établis d'après ces principes : le système électrostatique et le système électromagnétique ⁽²⁾.

Dans le système électrostatique, on prend arbitrairement, comme unité de quantité d'électricité, celle qui repousse avec une force égale à l'unité une égale quantité d'électricité *placée dans l'air* à l'unité de distance de la première.

Dans le système électromagnétique, on prend arbitrairement, comme unité de masse magnétique, celle qui repousse avec une force égale à l'unité une masse magné-

(¹) Je ne crois pas qu'il y ait eu d'expériences instituées spécialement en vue de contrôler la relation $\mu' = 2\mu$; mais une vérification indirecte et précise en est fournie, pour l'air, par la concordance des expériences dites de détermination de l'ohm, qui ont nécessité soit des mesures magnétiques (μ), soit des mesures électrodynamiques (μ'). En admettant d'ailleurs que l'influence du milieu se fasse sentir par la seule présence des coefficients k, μ, μ' , la relation $\mu' = 2\mu$ peut être considérée comme une traduction de la proposition bien vraisemblable que voici :

Si les actions d'un courant A et d'un aimant B sur un petit aimant C sont équivalentes, il en sera de même des actions de A et B sur un élément de courant mis à la place C.

(²) Qu'on nous permette de dire encore qu'il s'agit ici des unités et nullement des dimensions.

tique égale *placée dans l'air* à l'unité de distance de la première.

Dans le premier système, la valeur du coefficient k , relatif au milieu *air*, est égale en 1. C'est, au contraire, le μ de l'air qui, dans le deuxième système d'unités se trouve avoir cette valeur 1.

Nous représenterons par φ le nombre d'unités électrostatiques contenues dans l'unité électromagnétique de quantité d'électricité. Les cinq équations fondamentales donneront alors l'ensemble des relations :

$$\left. \begin{array}{l} \text{L'unité électromagnétique} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{de quantité d'électricité} \dots\dots\dots \\ \text{de courant} \dots\dots\dots \\ \text{de force électromotrice} \dots\dots\dots \\ \text{de capacité} \dots\dots\dots \\ \text{de résistance} \dots\dots\dots \\ \text{de masse magnétique} \dots\dots\dots \end{array} \right. \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varphi \\ = \varphi \\ = \frac{1}{\varphi} \\ = \varphi^2 \\ = \frac{1}{\varphi^2} \\ = \frac{1}{\varphi} \end{array} \left. \begin{array}{l} \text{unités électrostatiques.} \end{array} \right.$$

§ 2. — Le rapport φ .

Le rapport φ des unités d'électricité est un nombre dont la valeur dépend du choix des unités fondamentales, et dépend aussi du milieu où sont supposées faites les expériences, l'air dans le cas actuel.

Il n'y a dans cela rien de mystérieux, car les deux grandeurs dont on prend le rapport dépendent du milieu. Ce rapport φ est donc la mesure d'une certaine propriété spécifique de ce milieu, mesure qui dépend et de la nature du milieu, et des unités choisies.

Un exemple plus familier montrera peut-être mieux notre pensée. Imaginons deux cubes de cuivre, l'un ayant une masse égale à l'unité de masse, l'autre une arête égale à l'unité de longueur. Le rapport des poids de nos deux

cubes est un nombre, mais sa valeur dépend des unités de masse et de longueur choisies; il mesure une propriété spécifique du cuivre, sa densité.

Cherchons donc la signification de ν .

Nous emploierons provisoirement un système auxiliaire d'unités C.G.S. qui satisfera à nos cinq conditions fondamentales, mais ne sera ni le système électrostatique, ni le système électromagnétique.

Représentons par m la mesure, dans ce système d'unités, de la charge électrique qui réalise l'unité électromagnétique. Les formules fondamentales nous montreront de suite que l'unité électromagnétique de masse magnétique a pour mesure $\frac{1}{m}$. La définition de l'unité électromagnétique de masse magnétique nous donne

$$1 = \frac{\frac{1}{m} \cdot \frac{1}{m}}{\mu},$$

d'où

$$m = \sqrt{\frac{1}{\mu}}.$$

Soit maintenant s la mesure actuelle de l'unité électrostatique de quantité. La loi de Coulomb s'écrit ici

$$1 = \frac{s \cdot s}{k},$$

d'où

$$s = \sqrt{k},$$

et, par suite,

$$\nu = \frac{m}{s} = \frac{1}{\sqrt{\mu k}}.$$

D'après la manière dont on l'établit, la relation $\nu = \frac{1}{\sqrt{\mu k}}$ serait encore exacte si l'on abandonnait les systèmes C.G.S.

pour prendre d'autres unités de longueur, de masse et de temps.

La détermination numérique de ν présente un intérêt tout particulier. Maxwell a, en effet, montré ⁽¹⁾ que, moyennant quelques hypothèses, le nombre $\frac{1}{\sqrt{\mu k}}$ doit mesurer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu envisagé. Ce sera aussi la vitesse de propagation des ondes lumineuses si l'on admet l'hypothèse fondamentale de la théorie électromagnétique de la lumière.

Pour ne pas compliquer la question de la difficulté résultant de la dispersion, on est conduit à admettre que ν représente la vitesse de propagation d'une perturbation à longueur d'onde infinie.

On est alors loin des ondes lumineuses, et ce n'est plus que par une extrapolation singulièrement hardie qu'il est permis de passer des longueurs d'onde de l'ordre du micron à une longueur d'onde infinie.

Les ondulations hertziennes, avec leurs périodes sensibles, sont plus voisines du cas limite; malheureusement il faut encore être très réservé sur l'interprétation des mesures faites, car la théorie est passablement indécise.

Des expériences récentes ⁽²⁾ semblent indiquer qu'il y a effectivement pour ces ondes une vitesse de propagation indépendante de la période, vitesse comprise entre

$$288,3 \quad \text{et} \quad 304,1 \cdot 10^8 \frac{\text{centim.}}{\text{seconde}},$$

⁽¹⁾ *On a method of making a direct comparison of electrostatic with electromagnetic force, with a Note on the electromagnetic theory of light*, by J. Clerk Maxwell (*Phil. Trans.*, p. 643-657; 1868).

⁽²⁾ R. BLONDLOT, *Journal de Physique*, 2^e sér., t. X, p. 549-561; 1891.

Les mesures directes de la vitesse de la lumière ont donné

$$300.10^8 \frac{\text{centim.}}{\text{seconde}},$$

avec une précision qui paraît être de l'ordre du millième.

Nous verrons que cette précision peut, dès maintenant, être au moins atteinte dans la détermination de ν .

PREMIÈRE PARTIE.

HISTORIQUE.

CHAPITRE I.

PREMIÈRES TENTATIVES. — LES MÉTHODES. — TABLEAU GÉNÉRAL DES EXPÉRIENCES.

Nous ne mentionnerons que pour mémoire celles des tentatives de comparaison numérique des effets du courant de décharge d'un condensateur et du courant galvanique pour lesquelles font défaut une partie des données nécessaires au calcul du rapport ν . Ce qui manque surtout, c'est la connaissance des propriétés du verre des bouteilles de Leyde employées dans ces recherches.

Les premiers essais paraissent dus à Faraday, qui déchargeait une batterie dans un galvanomètre gradué par l'électrolyse ⁽¹⁾. Des expériences analogues furent faites

(¹) FARADAY, *Exp. Res.*, 3^e sér., § 364; 1833; 7^e sér., § 861; 1834. Voy. aussi *Phil. Trans.*, p. 33; 1883; et p. 77; 1834.

par Peltier ⁽¹⁾, par Becquerel ⁽²⁾ dans son travail sur la polarisation des électrodes, puis par Buff ⁽³⁾.

Ce furent seulement les expériences de Weber et Kohlrausch ⁽⁴⁾ qui marquèrent la première étape dans la voie d'une détermination précise de ν . Nous reviendrons plus loin sur ces mesures.

En raison de l'importance des applications industrielles de l'électricité, l'Association britannique nommait, en 1861, une Commission ⁽⁵⁾ chargée de fixer une unité de résistance. Cette Commission, plus nombreuse en 1862, élargissant elle-même le programme de ses recherches, résolut de les étendre à toutes les unités électriques, et un Rapport d'ensemble fut rédigé en 1863. A la suite de ce Rapport (Appendice C) est le célèbre Mémoire de Maxwell et Jenkin ⁽⁶⁾ sur la théorie générale des mesures électriques. Là se trouvent indiqués pour la première fois les différents procédés qui peuvent conduire à la détermination de ν .

Maxwell et Jenkin s'expriment ainsi :

« Pour obtenir la valeur de ν , il est nécessaire et suffisant d'effectuer une mesure électrostatique et une mesure électromagnétique d'une des grandeurs : quantité d'électricité, courant, résistance, force électromotrice, capacité.

⁽¹⁾ PELTIER, *Annales de Chimie et de Physique*, 2^e sér., t. LXVII, p. 422-444; 1833.

⁽²⁾ BECQUEREL, *Comptes rendus*, t. XXII, p. 383-404; 1846.

⁽³⁾ BUFF, *Annales de Chimie et de Physique*, t. LXXXVI, p. 28; 1853.

⁽⁴⁾ R. KOHLRAUSCH und W. WEBER, *Electrodyn. Maassbest. Abhand. d. Kön. Sächs. Gesellsch. d. Wissensch. zu Leipzig, Math. phys. Classe*, dritter Band; 1857.

⁽⁵⁾ That prof. Williamson, prof. Wheatstone, prof. W. Thomson, prof. Miller (of Cambridge), Dr Matthiessen and M. F. Jenkin be a Committee to report upon Standard of electrical resistance; and that the sum of £ 50, be placed at their disposal for the purpose.

⁽⁶⁾ MAXWELL et JENKIN, *Elementary relations between electrical measurements* (*Reports of the B. A.*, p. 130-162; 1863).

Il y a donc cinq méthodes conduisant à la détermination de ν .

» 1° Par des mesures de charges..... La seule difficulté consiste à déterminer le potentiel P , ce qui entraîne la mesure absolue de la force qui s'exerce entre deux corps électrisés.

» 2° Par des mesures de forces électromotrices..... La mesure électromagnétique de la force électromotrice se déduira de l'intensité du courant produit dans une résistance connue en valeur absolue.....

» 3° Par des mesures de résistances..... Le rapport donnera ν^2 La mesure d'une résistance en unités électrostatiques n'est pas encore susceptible d'une grande exactitude.

» 4° Par des mesures d'intensités de courants..... Le courant sera produit par les décharges d'un condensateur..... Il faudra mesurer le potentiel auquel on charge ce condensateur.

» 5° Par des mesures de capacité..... Le rapport donnera ν^2 . *Cette méthode fournira probablement des résultats très précis.* »

Soulignons cette dernière appréciation et faisons observer que l'on pourra prendre comme capacité à mesurer le *coefficient de débit* d'une machine électrostatique à influence (¹).

Aux méthodes précédentes, il convient d'en ajouter

(¹) J'ai moi-même entrepris quelques recherches par ce procédé, en employant une machine électrostatique à influence de forme géométrique et bien connue (*Journal de Physique*, 1892). J'ai pu constater que le débit est exactement proportionnel à la vitesse et au potentiel de charge; mais la détermination *a priori* du coefficient de débit n'a pu être faite au delà du centième, parce que l'on ne peut pas apprécier exactement la perturbation apportée par le plateau de verre, qui servait de support aux *porteurs*, et que cette action est de l'ordre du centième.

deux autres, qui ne sont actuellement pas susceptibles d'une grande précision.

« 6° Par des mesures de la période t d'une décharge oscillante. La quantité νt peut, en effet, être calculée d'après les dimensions de l'appareil.

» 7° Par la mesure du champ magnétique produit par le déplacement d'un corps électrisé; ce sera, si l'on veut, une variante de la quatrième méthode (intensités). »

Il n'est pas absolument nécessaire de faire des mesures absolues dans les deux systèmes d'unités, et il est possible d'arriver à la valeur de ν en compensant une attraction électrostatique par une répulsion électromagnétique; c'est le principe même des expériences de Maxwell.

De tous ces procédés de mesures, ceux que désignent les chiffres 1, 4, 6, 7 sont complets par eux-mêmes. Les procédés 2, 3 et 5, au contraire, exigent la connaissance d'une résistance en valeur absolue; les résultats numériques dépendent alors de la valeur absolue de l'ohm légal.

Nous admettrons, pour l'unité de l'Association britannique, la valeur

$$\text{BAU} = 0^{\text{ohm}},98664;$$

pour l'ohm légal

$$\text{ohm légal} = \frac{106}{106,25} \text{ ohm},$$

et nous ne donnerons que des résultats corrigés.

Voici, maintenant, la liste générale des mesures faites par ces diverses méthodes :

I. *Mesures de charges.*

Weber et Kohlrausch	1856
Rowland	1879

II. *Mesures de forces électromotrices.* — Expériences assez nombreuses; un certain nombre ont été effectuées

sous la direction de Sir W. Thomson, qui avait lui-même entrepris des mesures de ce genre dès 1860 :

W. Thomson et King.....	1869
Mac Kichan.....	1873
Shida.....	1880
W. Thomson, Ayrton et Perry.....	1888

Joignons à ces noms ceux de

Exner.....	1882
Pellat.....	1891

et, à part,

Maxwell.....	1868
--------------	------

III et IV. Comme expériences faites par la décharge partielle d'un condensateur, *mesures de résistances*, nous avons celles de

Klémencic.....	1886
----------------	------

que nous étudierons avec les autres mesures de l'auteur. Joignons-y le travail de

A.-G. Webster... ..	1891
---------------------	------

pour lequel je n'ai connaissance que d'une Note de quelques lignes donnée aux *Reports of brit. Ass.* ⁽¹⁾, qui n'indique guère que le résultat

$$\nu = 298,7 \cdot 10^8.$$

La méthode des *mesures d'intensités* n'a fourni que les expériences incomplètes de

Branly.....	1872
-------------	------

V. *Mesures de capacités*. — C'est la méthode la plus

(¹) A.-G. WEBSTER, *Rep. brit. Ass.*, p. 580-581; 1891. *Some Experiments on a new method for the determination of ν .*

sûre; c'est aussi celle qui a été le plus employée. Nous distinguerons trois variantes, caractérisées par le procédé de mesure électromagnétique des capacités. Ce sont :

Va. Un procédé alterné. Mesure du courant de décharge avec un *galvanomètre balistique* que l'on étalonne, après les décharges, par une dérivation prise sur la pile de charge. Telles sont les expériences de

Ayrton et Perry.....	1879
Stoletow.....	1880
Klémencic.....	1881
Klémencic.....	1884

Vb. Compensation des effets du courant de décharge et du courant continu dans un pont de Wheatstone :

J.-J. Thomson.....	1883
Himstedt.....	1887
Rosa.....	1889
J.-J. Thomson.....	1890

Vc. Compensation des effets du courant de décharge et du courant continu dans un galvanomètre différentiel. Ce procédé a été employé par

Klémencic.....	1884
Klémencic.....	1886
Himstedt.....	1886
Himstedt.....	1888

VI. Nous n'analyserons pas les expériences intéressantes, mais peu précises, de

Colley.....	1886
-------------	------

qui détermine la période d'oscillation de la décharge, en admettant que l'aiguille de son galvanomètre suit exactement les variations d'intensité du courant ⁽¹⁾. Le nombre donné par l'auteur,

$$301,5 \cdot 10^8,$$

(1) COLLEY, *Wiedemann's Annalen*, XXVIII, p. 1; 1886.

est voisin de la valeur exacte; son hypothèse peut donc être admissible; mais on ne peut avoir une bien grande confiance dans le résultat des mesures.

Nous devons signaler ici des expériences, que nous croyons encore inédites, de

Lodge et Glazebrook..... 1889 ⁽¹⁾

VII. Les remarquables expériences de

Rowland..... 1878 ⁽²⁾

Rowland et Hutchinson..... 1889 ⁽³⁾

sur les *Actions magnétiques produites par la convection électrique* n'ont pas non plus à attirer notre attention, puisque les valeurs de ν ont varié de

226.10^8 à 378.10^8 .

Les Chapitres qui vont suivre sont consacrés à l'étude de toutes ces expériences. On les a groupées par méthodes en respectant à peu près l'ordre historique.

CHAPITRE II.

MESURES DE CHARGES.

WEBER ET KOHLRAUSCH. — ROWLAND.

§ 1. — Les expériences de Weber et Kohlrausch ⁽⁴⁾.

Ces mesures peu précises ont surtout un intérêt historique.

⁽¹⁾ O.-J. LODGE et R.-I. GLAZEBROOK, *On the determination of ν by means of electric oscillations* (*Rep. of B. A.*, p. 497; 1889).

⁽²⁾ ROWLAND, *American Journal of Science and Arts*, p. 30; 1878.

⁽³⁾ ROWLAND et C.-T. HUTCHINSON, *Phil. Mag.*, XXVII, p. 445; 1889.

⁽⁴⁾ R. KOHLRAUSCH und W. WEBER, *Electrodynamische Maassbestimmungen, insb. zurückführung der Stromint. Mess. auf mech. Maas.* (*Abhand. der math. phys. Classe der König. Sächsischen*

Le problème expérimental à résoudre était double; il fallait :

1° Mesurer en unités électrostatiques absolues la charge d'un condensateur;

2° Mesurer en unités électromagnétiques absolues le courant de décharge.

L'électricité était accumulée dans une bonne bouteille de Leyde. On en prenait une fraction en touchant l'armature intérieure avec une sphère conductrice isolée ayant environ 32^{cm} de diamètre. Cette sphère, à son tour, était mise en contact avec une autre plus petite (diamètre, 2^{cm}, 3), dont on mesurait enfin la charge en unités électrostatiques absolues dans une grande balance de Coulomb. Le rapport des charges portées par les deux sphères au contact se déduisait des calculs de Poisson et de Plana. Un électromètre des sinus mesurait le potentiel et, par suite, la charge de la bouteille avant et après le contact de la grosse sphère.

La valeur électromagnétique de la décharge était obtenue au moyen d'un galvanomètre balistique de construction connue et la mesure était naturellement complétée par une détermination de l'intensité du champ terrestre.

Une cause d'erreurs assez grave, entrevue par les auteurs, fut surtout mise en lumière plus tard par Maxwell. Elle provient des résidus de la bouteille de Leyde. La décharge que mesure le balistique est toujours incomplète et la bouteille retient une fraction, d'ailleurs variable, de la charge, fraction qui atteint parfois 8 et 10 pour 100.

Ges. der Wiss., Bd. III. Leipzig, p. 221-292; 1857). Voir encore le Mémoire de Kohlrausch rendant compte de ces mesures (*Pogg. Ann.*, t. XCIX, p. 10-25; 1856)], et aussi KOHLRAUSCH, *Pogg. Ann.*, t. CLVII; 1856; VOIGT, *Wied. Ann.*; t. II; 1877 (où se trouve relevée une très petite erreur de formule).

Cette incertitude n'est rien, toutefois, à côté de celle qui règne sur la valeur du coefficient de partage des charges entre la bouteille de Leyde et la grosse sphère. L'électromètre des sinus donne le rapport n des charges de la batterie avant et après le contact; $(n - 1)$ est le coefficient en question. Le rapport n a été déterminé cinquante-cinq fois et les valeurs trouvées ont oscillé entre 1,0167 et 1,0490. A première vue, la concordance semble satisfaisante, mais cet accord n'est qu'apparent et, en fait, la discordance est complète. Il ne faut pas oublier, en effet, que c'est $(n - 1)$ qui intervient, $(n - 1)$ qui a varié de 0,0167 à 0,0490, soit *presque du simple au triple*. Et toute l'indécision se reporte sur la valeur de ν .

Il faudrait ajouter à cela de petites erreurs dues à des défauts d'isolements, à des déperditions dans la balance de Coulomb, à l'amortissement du galvanomètre, Ces erreurs expérimentales proprement dites n'ont certes pas dû être bien considérables, car les cinq valeurs trouvées dont la moyenne est

$$310,74 \cdot 10^8$$

ne s'écartent pas l'une de l'autre de plus de 7,5 pour 100.

De tout cela résulte qu'il est permis de considérer comme assez optimiste cette conclusion des auteurs que la valeur de ν serait connue par leurs mesures à 1 ou 2 pour 100 près.

§ 2. — *Les expériences de Rowland* ⁽¹⁾.

Rowland substitue à la bouteille de Leyde, de Weber et Kohlrausch, un condensateur à lame d'air constitué par

(¹) Ces expériences datent de 1879. Vu leur peu de précision, l'auteur ne les publia, en 1889, qu'en raison d'un travail ultérieur de Rosa sur lequel nous reviendrons. Elles ont paru au *Phil. Mag.*, 5^e sér., t. XXVIII, p. 304-315; 1889-2. — HENRY-A. ROWLAND, with the assistance of E.-H. HALL and L.-B. FLECHTER, *On the ratio of the electrostatic to the electromagnetic unit of Electricity*.

deux sphères concentriques. La valeur électrostatique de la capacité est calculée au moyen du rayon des sphères que l'on détermine par des jaugeages à l'eau; la quantité d'électricité mise en jeu est déduite de la mesure du potentiel de charge faite avec un électromètre Thomson absolu.

Quant au galvanomètre balistique, sa constante est obtenue par comparaison avec un électrodynamomètre de construction connue.

Les diverses parties du dispositif ont été étudiées séparément; chacune paraissait donner une précision de $\frac{1}{1000}$ à $\frac{3}{1000}$, sauf naturellement pour la mesure du champ terrestre qui est moins sûre. Il semblait donc que le résultat eût pu être assez exact; les vingt-neuf nombres obtenus ont pourtant varié de

$$295,02 \cdot 10^8 \text{ à } 301,82 \cdot 10^8,$$

et l'auteur ne sait à quoi attribuer ces écarts considérables.

On en trouverait sans doute la raison dans le nombre excessif des déterminations nécessaires.

Il faut, en effet, — outre la valeur du champ terrestre, — connaître tout d'abord : la capacité du condensateur, — la constante de l'électromètre, — celles de l'électrodynamomètre et le moment d'inertie de sa bobine mobile, — les dimensions du circuit qui sert à réduire le champ terrestre autour du balistique, — les distances des échelles graduées aux miroirs; toutes quantités qui, il est vrai, varient peu et n'introduiront que des erreurs systématiques. Mais ce n'est pas tout et, à chaque expérience, il faut mesurer : l'attraction des disques de l'électromètre, — les durées et les décréments logarithmiques des oscillations de la bobine mobile dans l'électrodynamomètre et de l'aiguille aimantée dans le balistique, — plus l'arc de première impulsion de cette aiguille quand passe la décharge. Il y a enfin à effectuer sur cette impulsion une correction très incertaine

dépendant de la position qu'occupait l'aiguille à l'instant où l'on envoyait les quatre ou cinq décharges consécutives du condensateur.

Ces critiques ne s'adressent pas tant, comme on voit, aux expériences mêmes de Rowland qu'au principe de la méthode des mesures de charges qu'il a employée. La précision obtenue ne paraît pas avoir dépassé le cinquantième, étant donné encore que l'auteur ne tenait pas compte de la capacité des fils de communication.

CHAPITRE III.

MESURES DE FORCES ÉLECTROMOTRICES.

W. THOMSON; W. THOMSON ET KING; M^e KICHAN; SHIDA; W. THOMSON;
AYRTON ET PERRY; EXNER; PELLAT; MAXWELL.

MESURES D'INTENSITÉS.

BRANLY.

§ I. — *Théorie de la méthode.*

Nous adoptons pour nos calculs le système électromagnétique d'unités C.G.S.

Les expériences que nous allons décrire supposent toutes qu'une résistance est connue en valeur absolue.

On évalue en effet, avec l'électromètre absolu, la différence de potentiel E existant entre deux points séparés par une résistance R dans un circuit que parcourt un courant dont l'intensité, I , est mesurée à part.

Ce que donne la lecture de l'électromètre absolu, c'est toujours la valeur électrostatique e de la force électromotrice, en sorte que l'on a

$$\nu = \frac{E}{e}.$$

Comme, d'ailleurs,

$$E = IR,$$

il vient

$$\nu = \frac{I.R.}{e}.$$

La résistance R doit être comparée à un étalon.

§ 2. — *Les expériences de W. Thomson et King* ⁽¹⁾,
de *M^c Kichan* ⁽²⁾, de *Shida* ⁽³⁾.

Toutes ces mesures ont été faites dans les laboratoires ou sous la direction de Sir W. Thomson, par des procédés et avec des appareils semblables. Nous nous occuperons surtout de celles de M^c Kichan, qui semblent les plus exactes.

La force électromotrice d'une batterie de piles est mesurée en unités électrostatiques par un électromètre absolu de Thomson; un électrodynamomètre donne l'intensité du courant, les résistances sont comparées à l'unité dite BAU.

La comparaison des résistances comportait une précision du millième, mais guère plus en raison des variations rapides de la température, dues en partie au passage du courant.

L'exactitude de la mesure d'intensité est limitée par la précision avec laquelle on pouvait connaître le couple de torsion du fil qui suspend la bobine mobile. Or une telle détermination est toujours difficile : après avoir déterminé le moment d'inertie de la bobine mobile, il faut étudier ses oscillations. Ces oscillations ont, comme les déviations

⁽¹⁾ *Description of the Sir W. Thomson's experiments for the determination of ν the number of electrost. units in the electromagn. unit*; by W.-F. King (*Rep. Brit. Ass.*, p. 434; 1869).

⁽²⁾ DUGALD M^c KICHAN, *Determination of the number of electrost. units in the electromagn. unit* (*Phil. Trans.*, 1873, p. 409); voyez aussi *Phil. Mag.*, série IV, t. XLVII, p. 218; 1874.

⁽³⁾ R. SHIDA, *On the number of electrost. units in the electromagn. unit* (*Phil. Mag.*; série V, t. X, p. 431; 1880-2).

elles-mêmes, une amplitude notable et le couple de torsion ne saurait être simplement proportionnel à la déviation angulaire. Aussi l'auteur faisait-il osciller la bobine pendant le passage du courant, alors qu'elle était déviée. Une nouvelle difficulté en résulte, car l'oscillation de la bobine n'est plus produite par la torsion seule, mais aussi par le couple électrodynamique lui-même, et c'est un certain couple résultant que l'on mesure. En outre, l'amortissement se complique; les courants d'induction acquièrent une influence; et puisque l'auteur a constaté des différences de $\frac{1}{2}$ pour 100 entre les valeurs du couple avant et pendant la déviation, on peut bien considérer ce demi-centième comme une limite supérieure de la précision des mesures à l'électrodynamomètre.

L'électromètre absolu qui a servi n'était pas très sensible, puisque, même avec les 180 éléments employés, les mesures n'ont jamais porté sur plus de 60 divisions de la vis micrométrique. Les lectures isolées n'ayant pas été sûres à plus de 3 ou 4 dixièmes de division, c'est en effet là un écart fréquent entre deux déterminations immédiatement consécutives: c'est encore $\frac{1}{200}$ de douteux. À côté de cela, le réglage du plateau mobile, le fonctionnement de la jauge étaient-ils parfaits? Il est assez difficile de se prononcer sur ces points comme sur celui de savoir si la correction due à l'influence des bords des plateaux était suffisante, mais l'erreur *possible* pouvait bien être de l'ordre de grandeur des erreurs accidentelles que l'auteur lui-même a cru pouvoir accepter, c'est-à-dire de l'ordre du centième.

Si l'on ajoute qu'une baisse progressive de la force électromotrice de la pile forçait à multiplier les mesures en les croisant, que l'isolement n'était pas parfait, puisqu'il fallait faire agir le replenisher, que l'action de la terre n'était pas absolument compensée dans l'électrodynamomètre, ce qui entraînait un redoublement de mesures;

on s'expliquera alors pourquoi les nombres d'une même série de mesures varient de 1 et même 2 pour 100 et pourquoi l'ensemble des déterminations atteint les limites extrêmes

$$286,3.10^8; \quad 299,9.10^8.$$

$$\text{Moyenne : } 289.10^8 \text{ (1).}$$

Les résultats numériques obtenus en 1869 par Sir W. Thomson et King par la même méthode, mais avec des appareils moins bons, sont compris (correction de BAU faite) entre

$$271,4.10^8 \quad \text{et} \quad 288.10^8.$$

Ces expériences avaient été précédées de mesures incomplètes de Sir W. Thomson qui avait simplement déterminé la force électromotrice du daniell en unités électrostatiques (2).

La même méthode a été employée par Shida, en 1880, mais avec quelques modifications. L'intensité du courant est, cette fois, déduite de l'observation d'une boussole des tangentes accompagnée de la mesure du champ terrestre.

La force électromotrice de la pile était, il est vrai, mesurée à l'électromètre en circuit ouvert, mais la force électromotrice aux bornes, en circuit fermé, était comparée à celle-là, au moyen d'un électromètre à quadrants. Ces expériences ne paraissent guère supérieures à celles de M^c Kichan. Il est difficile, toutefois, de les bien apprécier, car Shida n'a jamais publié à leur sujet qu'une simple Note où se trouvent d'ailleurs plusieurs erreurs de nombres (3).

(1) Nombres réduits à BAU = 0,98664.

(2) Sir W. THOMSON, *Measurement of the electrostatic force produced by a Daniell's battery* (*Proceedings R. S.*, febr. 23 and apr. 12; 1860; *Phil. Mag.*, 1860, 2; *Reprint of Papers*, XVIII, § 305, 319).

(3) Ces erreurs ont donné lieu à une polémique assez longue entre R. Shida et le D^r C.-R.-A. Wright, qui fit à l'auteur diverses critiques

Une première détermination a donné la valeur (corrigée)

$$\nu = 290,4 \cdot 10^8.$$

Puis cinq autres, où l'auteur tint compte de la torsion du fil dans la boussole des tangentes, conduisirent à des nombres différant entre eux d'un peu moins de 1 pour 100; leur moyenne corrigée est

$$295,5 \cdot 10^8.$$

§ 3. — *Les expériences de Exner* ⁽¹⁾.

La précision de ces mesures étant voisine de $\frac{4}{20}$, nous passerons assez vite.

Soit que l'électromètre ne fût pas assez sensible, soit que les piles fussent mal isolées ou trop variables, toujours est-il que la force électromotrice d'un daniell, déduite des mesures électrométriques, sembla varier de 8 pour 100 (moyenne : 0,00325).

La même force électromotrice était évaluée en unités électromagnétiques, en pesant le cuivre qui se dépose dans l'élément lui-même quand on le ferme pendant un certain temps sur une résistance connue. Les trois déterminations faites, qui s'écartent entre elles de 3 pour 100, ont pour moyenne

$$0,933 \cdot 10^8.$$

De là

$$\nu = 287 \cdot 10^8 \text{ (}^2\text{)}.$$

mal fondées. Voir *Phil. Mag.*, V, 11, 1881, 1, p. 368, p. 475; V, 12, 1881, 2, p. 76, p. 154, p. 224.

(¹) FRANZ EXNER, *Bestimmung des Verhältnisses zwischen electrostatischen und electromagnetischen Einheit* (*Sitz. Ber. Wien*, Bd 86; 1882, et *Exner's Rep. der Phys.*, t. XIX, p. 99).

(²) Les nombres donnés par Exner, $f.e.m = 0,978 \cdot 10^8$ et $\nu = 301 \cdot 10^8$ correspondent aux données numériques suivantes : 0,00324 pour l'équivalent électrochimique de cuivre et 0,009717 pour l'unité Siemens.

Nous leur avons substitué celles-ci, plus correctes : 0,00329 et $\frac{1}{106,25}$.

§ 4. — *Les expériences de Pellat* ⁽¹⁾.

Le Mémoire publié par M. Pellat ne renferme pas le détail complet de ses recherches. Il semble, cependant, que l'auteur ait obtenu de l'électromètre absolu actuel le maximum de précision qu'il puisse comporter. Le réglage des plateaux a été fait avec soin ; on a étalonné la vis et les ressorts ; on a supprimé le replenisher et éliminé en grande partie l'influence des déperditions dans l'électromètre par un croisement convenable des mesures, artifice qu'avait déjà utilisé Shida ; on a constamment réglé le dispositif des circuits, de manière à avoir un courant très constant dont l'intensité était mesurée à l'électrodynamomètre absolu de M. Pellat ; on a pris enfin des précautions particulières pour assurer l'isolement du circuit.

Malgré tout cela, la constante de l'électromètre n'est connue, d'après l'auteur, qu'à $\frac{4}{500}$, et ce $\frac{4}{500}$ limite aussi l'exactitude de ses indications : toute l'incertitude qui en résulte se reporte sur la valeur de ν . La moyenne des cinquante-trois déterminations, réduite à la valeur que nous adoptons pour l'ohm légal $\left(\frac{106}{106,25} \text{ ohm vrai}\right)$, devient

$$\nu = 300,78.10^8.$$

§ 5. — *Les expériences de Maxwell* ⁽²⁾.

Au lieu de mesurer séparément une force électrostatique et une force électromagnétique, Maxwell les équilibre l'une par l'autre.

⁽¹⁾ H. PELLAT, *Détermination du rapport entre l'unité électromagnétique et l'unité électrostatique d'électricité* (*Journ. de Phys.* [2], X, pp. 389-377; 1891).

Voyez aussi H. PELLAT, *Électrodynamomètre absolu* (*Journ. de Phys.*, [2], VI, p. 175; 1887).

⁽²⁾ *On a method of making a direct comparison of electrostatic*

Imaginez que l'on place verticalement les plateaux d'un électromètre absolu à anneau de garde et que, derrière chacun d'eux, on fixe une bobine plate; imaginez encore que le système formé du disque mobile de l'électromètre et de la bobine correspondante soit porté par le fléau horizontal d'une balance de torsion très sensible, l'autre extrémité du fléau étant munie d'une bobine compensatrice qui élimine l'action du champ terrestre. Vous aurez l'appareil même de Maxwell.

Toute cette disposition est assurément très remarquable pour son ingéniosité, mais n'est pas absolument appropriée à des mesures de précision. Toutes les difficultés que présente l'emploi des électromètres absolus et des électrodynamomètres absolus sont ici accumulées, et dans des conditions peu favorables, vu le manque de stabilité de l'appareil de suspension.

Mais, comme le dit Maxwell: « La difficulté principale vient du défaut de constance des piles, ... les courants ... varient très vite dès les premiers contacts. »

Une autre source d'erreurs se trouve dans l'isolement insuffisant de la pile (2600 éléments au sublimé). La valeur considérable des potentiels en jeu rendait d'ailleurs cet isolement particulièrement difficile. Les déperditions d'électricité étaient telles que l'opérateur lui-même arrivait à être fortement électrisé. Dans une série d'expériences où l'on réglait l'appareil pendant l'exécution des mesures, celles-ci se trouvèrent faussées par l'excès d'attraction dû à la main de l'observateur, et la valeur de ν diminua de $\frac{1}{20}$.

L'erreur systématique que peut dès lors entraîner la présence inévitable de l'opérateur et de différents sup-

with electromagnetic force; with a Note on the electromagnetic Theory of light, by J. CLERK MAXWELL (*Phil. Trans.*, juin 1868, pp. 643-657; des extraits ont paru dans *Rep. of B. A.*, 1869, p. 436, et *Phil. Mag.*, [4], XXXVI, p. 316; 1868.)

ports est précisément de même ordre de grandeur et du même sens que l'écart qui existe entre les déterminations récentes et le nombre (corrigé) que donne Maxwell

$$\nu = 284.10^8,$$

moyenne de 12 déterminations concordant entre elles à environ 3 pour 100.

Une remarque encore :

La théorie suppose les expériences faites *dans l'air*. Or la répulsion électrodynamique mesurée s'exerçait, non à travers l'air, mais à travers l'ensemble des deux plateaux métalliques de l'électromètre auquel il faut encore ajouter les lames de glace et les couches de *mélange de Hooper* qui servaient tant à fixer qu'à isoler les bobines. Il suffisait que toute cette matière eût quelque propriété magnétique pour que les valeurs de ν fussent altérées.

§ 6. — MESURES D'INTENSITÉS. *Les expériences de Branly* ⁽¹⁾.

L'auteur envoie, dans un galvanomètre à grande résistance, les décharges périodiques d'une sphère métallique chargée par une pile à un potentiel assez élevé que mesure une balance de Coulomb. La déviation obtenue est alors comparée à celle que donne le courant d'un élément Daniell fermé sur une résistance de 100^{km} (le mètre étant l'unité mercurielle de Pouillet); M. Branly trouve qu'il eût fallu $2,55.10^{12}$ unités électrostatiques d'électricité (millimètre-milligramme-seconde) pour produire ce dernier courant.

Mais ces mesures sont incomplètes. Les résistances n'avaient pas été étalonnées et l'on ignore ce que valait,

⁽¹⁾ R. BRANLY, *Évaluation en unités mécaniques de la quantité d'électricité que produit un élément de pile* (*Comptes rendus*, t. LXXVII, p. 1420-1422; 1872).

en volts, le daniell employé. Aussi les résultats sont-ils seulement donnés comme provisoires; les nombres définitifs n'ont, je crois, jamais été publiés.

CHAPITRE IV.

MESURES DE CAPACITÉS.

AYRTON ET PERRY, STOLETOW, J.-J. THOMSON, ROSA, KLEMENCIC, HIMSTEDT.

§ 1. — *Théorie de la méthode. Un nouveau procédé de détermination de l'ohm.*

On se sert d'un condensateur de forme connue. Sa capacité pourrait être calculée en unités électrostatiques, ce serait c ; en unités électromagnétiques, les seules dont nous ferons usage, ce sera

$$C = \frac{c}{\varphi^2}.$$

On charge ce condensateur au moyen d'une pile de force électromotrice E . Il s'y trouve alors une quantité d'électricité

$$Q = CE = \frac{c}{\varphi^2} E.$$

Variante a. — La décharge s'effectue dans un *galvanomètre balistique*; on mesure l'impulsion α et l'on a, abstraction faite de toute correction, l'égalité

$$(1) \quad Q = \frac{c}{\varphi^2} E = \frac{H}{G} \frac{T}{\Pi} \alpha,$$

où G est la constante du galvanomètre, et T la durée d'oscillation de l'aiguille aimantée.

On ferme ensuite la même pile sur un circuit comprenant une résistance R et le galvanomètre dont l'aiguille

subit une déviation β ; on peut écrire, toujours sans corrections,

$$(2) \quad \beta = \frac{G}{H} I = \frac{G}{H} \frac{E}{R}.$$

De ces équations on tire

$$Q = \frac{c}{v^2} E = \frac{E}{R} \frac{T}{H} \frac{\alpha}{\beta}$$

et, par suite,

$$v = \sqrt{\Pi \cdot \frac{I}{T} \frac{\beta}{\alpha} c R}.$$

Au lieu de n'obtenir dans le balistique qu'une seule impulsion α , il sera préférable de faire fonctionner périodiquement le condensateur de manière à avoir, par exemple, n décharges par seconde. La déviation permanente obtenue, α' , correspondra à une intensité moyenne du courant discontinu égale à

$$nQ = n \frac{c}{v^2} E,$$

et l'équation (1) devra être remplacée par celle-ci

$$\alpha' = \frac{G}{H} n \frac{c}{v^2} E.$$

L'équation (2) subsistant, il nous viendra

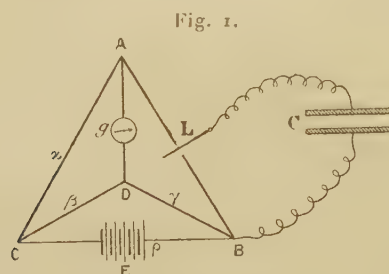
$$v = \sqrt{n \frac{\beta}{\alpha'} c R}.$$

Ces calculs conviennent à la *variante a* de la méthode (voir Chapitre I), celle où l'on étalonne le galvanomètre balistique après la mesure des décharges (procédé alterné).

Avec les deux autres variantes, le galvanomètre est actionné simultanément par le courant discontinu et par

le courant continu. L'aiguille aimantée est constamment ramenée au zéro, soit que l'on annule le courant en employant la disposition du pont de Wheatstone, soit, au contraire, que l'on monte le galvanomètre en différentiel.

Pour le procédé du pont de Wheatstone, le dispositif est celui qu'indique la *fig. 1*.



L, commutateur; C, condensateur; α , β , γ , g , ρ , résistances des branches du pont.

Nous aurons l'équation du problème en écrivant que la quantité d'électricité qui passe dans la branche AC, lorsque l'aiguille du galvanomètre g est immobile au zéro, demeurerait la même si, au lieu de faire fonctionner le condensateur n fois par seconde, on plaçait entre A et B la résistance $\frac{\alpha\gamma}{\beta}$, qui rétablirait l'équilibre.

Dans ce dernier cas, en négligeant la résistance de la pile, qui est toujours faible devant celle du circuit, l'intensité du courant qui passe en AC serait, comme on sait,

$$i = \frac{\beta E}{\alpha(\beta + \gamma)}.$$

Dans le premier cas, la quantité d'électricité qui passe en AC est précisément celle que débite le condensateur, puisqu'au total la branche AD n'est parcourue par aucun courant. Or le condensateur se charge chaque fois à une

différence de potentiel égale à celle qui existe entre A et B, lorsque le régime permanent est rétabli. Cette différence de potentiel est facile à calculer; on la trouve égale à

$$E \frac{\beta g + \gamma(\alpha + \beta + g)}{\beta(\alpha + g) + \gamma(\alpha + \beta + g)}.$$

La quantité d'électricité débitée par seconde est alors

$$i = nCE \frac{\beta g + \gamma(\alpha + \beta + g)}{\beta(\alpha + g) + \gamma(\alpha + \beta + g)};$$

égalant les deux valeurs de i et résolvant en C, on a

$$C = \frac{\beta[\beta(\alpha + g) + \gamma(\alpha + \beta + g)]}{n\alpha(\beta + \gamma)[\beta g + \gamma(\alpha + \beta + g)]} = \frac{c}{\nu^2},$$

d'où la valeur de ν

$$\nu = \sqrt{nc \frac{\alpha(\beta + \gamma)[\beta g + \gamma(\alpha + \beta + g)]}{\beta[\beta(\alpha + g) + \gamma(\alpha + \beta + g)]}}.$$

La fraction qui figure dans cette formule peut être considérée comme représentant une certaine résistance R; nous avons donc finalement

$$\nu = \sqrt{ncR}.$$

La théorie est beaucoup plus simple pour la *variante c*, où l'on emploie le galvanomètre différentiel.

Le circuit de la pile comprend une grande résistance R et un système de dérivations qui permet d'envoyer dans l'un des fils du galvanomètre différentiel une fraction connue φ du courant principal. Si E est la force électromotrice aux extrémités de R, l'intensité de ce courant permanent est

$$i = \varphi \frac{E}{R}.$$

C'est cette même force électromotrice E qui sert à

charger le condensateur. Aussi, pour n décharges par seconde, le débit d'électricité est-il égal à

$$i' = n CE.$$

Si le différentiel est supposé parfait, on doit avoir

$$i = i'.$$

c'est-à-dire

$$n CE = \varphi \frac{E}{R},$$

d'où

$$C = \frac{\varphi}{n R}$$

et, par suite,

$$\nu = \sqrt{n \frac{1}{\varphi} c R}.$$

Les formules qui conviennent aux trois variantes de la méthode sont toutes trois du même type; ν est donné par une racine carrée. De là résulte que la moitié seulement de l'erreur relative commise sur chaque détermination se reporte sur la valeur de ν .

Nous voyons que la valeur des résistances n'entre dans ces formules que par sa racine carrée. Dans la méthode des forces électromotrices, au contraire, une résistance R se trouvait à la première puissance. Ces deux remarques conduisent à envisager un *procédé de détermination de l'ohm* qui ne paraît pas avoir encore été signalé :

On fera les mesures nécessaires à la détermination de ν par les deux méthodes (forces électromotrices, capacités) en laissant indéterminée la valeur absolue R de la résistance de comparaison. On égalera les deux valeurs de ν ; l'équation, résolue par rapport à R , donnera cette valeur absolue et, par suite, la valeur de l'ohm.

Nous verrons bientôt que la méthode du galvanomètre différentiel est susceptible d'une très grande exactitude;

aussi la précision du procédé de détermination de l'ohm, dont nous venons de parler, serait-elle limitée surtout par la difficulté d'avoir de bonnes mesures électrométriques absolues.

Ce qui ferait le principal intérêt de cette méthode c'est qu'elle ne serait basée en aucune manière sur les lois des phénomènes d'induction.

§ 2. — *Les expériences de Ayrton et Perry* ⁽¹⁾.

Expériences faites par la *variante a* de la méthode des capacités (procédé du galvanomètre balistique, décharge unique).

Le condensateur étalon était un condensateur à plateaux carrés, avec anneau et boîte de garde, le tout en laiton. On se servait d'un système de supports rigides et de vis à pas fin pour maintenir et régler les plateaux en laissant libre la lame d'air qui les sépare. Cette disposition est assez bonne, comme aussi le mode de fonctionnement du commutateur, que laissait toujours le système de garde au sol. Le collecteur étant aussi au sol se charge par influence lorsque l'autre armature (inductrice) est mise en communication avec la pile (382 daniells). L'électricité qui s'y trouve s'écoulera ensuite dans le sol à travers le galvanomètre après que l'inducteur aura été déchargé. Il eût été toutefois préférable, pour éviter toute déperdition, de disposer les contacts de manière à décharger simultanément les deux armatures.

Les auteurs ont malheureusement commis une omission assez grave ; *ils n'ont pas tenu compte de la capacité des fils de communication du condensateur*. Cet oubli, qui a été relevé par Himstedt, conduit à prendre pour la capa-

(¹) W.-E. AYRTON ET J. PERRY, *A new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electric quantity* (*Phil. Mag.* [5], t. VII, p. 277; 1879-1).

cié c et, par conséquent, pour ν une valeur trop petite, et l'erreur qui en résulte pourrait très bien être de plusieurs centièmes.

Devant une si grosse incertitude, il est inutile de chercher par ailleurs le degré de précision des mesures et d'insister sur la difficulté qu'il y a à évaluer exactement la capacité du condensateur. Les auteurs n'indiquent d'ailleurs pas comment se fait cette détermination.

Notons seulement que les erreurs accidentelles atteignent 1 pour 100, puisque les trois nombres trouvés (réduits à $BAU = 0^w, 9866$) sont

$$295,4; \quad 297,5; \quad 295,2 \quad \text{Moyenne...} \quad 296.10^8.$$

Ce résultat, en résumé, pourrait n'être exact qu'à quelques centièmes : les auteurs accusent 1 pour 100 ⁽¹⁾.

§ 3. — *Les expériences de Stoletow* ⁽²⁾.

(Variante α : galvanomètre balistique, décharges périodiques.)

Stoletow a publié, en 1881, une Note indiquant seulement les résultats *provisoires* de ses recherches qui dataient déjà de cinq ou six ans; un accident avait interrompu les mesures qui, je crois, n'ont jamais été reprises.

Le dispositif paraissait pourtant bien étudié. Dans le condensateur, analogue à celui de Ayrton et Perry, les dé-

(¹) Nous ne saurions en aucune façon nous associer aux considérations générales par lesquelles débute le Mémoire de MM. Ayrton et Perry : « Le rapport de deux longueurs est un nombre ..., mais diviser une des unités de quantité d'électricité par l'autre, cela ressemble plutôt à la division d'un volume par une surface, division où le quotient est une longueur. C'est ainsi que le rapport des unités d'électricité est non un nombre, mais une vitesse. »

(²) STOLETOW, *Sur une méthode pour déterminer le rapport des unités électromagnétiques et électrostatiques* (le ν de Maxwell) (*Journ. de Phys.*, p. 468-474; 1881).

placements d'un plateau sont mesurés au moyen de trois microscopes pourvus de micromètres. D'autre part, les décharges périodiques, une centaine par seconde, sont obtenues au moyen d'un commutateur formé d'une roue tournant horizontalement et portant deux aiguilles inclinées qui établissent successivement les communications voulues avec une série de coupelles à mercure disposées circulairement autour de l'axe.

Il est tout à fait impossible de dire la valeur des nombres donnés par Stoletow

$$298.10^8 \text{ à } 300.10^8$$

puisque aussi bien l'auteur lui-même *ne saurait se décider pour un chiffre définitif*, et qu'au surplus on ignore la valeur de l'ohm étalon qui fut employé.

§ 4. — *Sur le procédé du pont de Wheatstone.*

Je tiens à faire les plus expresses réserves sur le principe même de la méthode, sur l'emploi du pont de Wheatstone pour la mesure précise d'une capacité.

On admet dans la théorie de l'expérience que la quantité d'électricité qui passe dans la branche AC, lorsque l'aiguille du galvanomètre est immobile au zéro, demeurerait la même si, au lieu de faire fonctionner n fois par seconde le condensateur C, on plaçait entre A et B la résistance $\frac{\alpha\gamma}{\beta}$ qui rétablirait l'équilibre (*fig. 1*).

Or rien n'est moins certain* que la proposition qui vient d'être énoncée.

Ce ne sont pas les phénomènes d'induction que nous avons en vue puisque, les courants étant périodiques, la quantité totale d'électricité induite est nécessairement nulle. Mais, si la self-induction du circuit est sans importance, il n'en est plus de même de la capacité parasite des

divers conducteurs. Je ne parle pas seulement de la capacité des fils qui relient le condensateur aux appareils de mesures, résistances et galvanomètre, mais surtout de la capacité de ces bobines de résistances, de ce galvanomètre et aussi de l'anneau de garde du condensateur. Le partage des courants instantanés entre les branches du pont dépendra de la distribution des charges électrostatiques, et cette distribution est à la fois variable et inconnue.

C'est là une cause d'erreurs qui n'est nullement négligeable *a priori* : on sait que les enroulements de fil fin, tels que ceux qui constituent le circuit, peuvent jouer le rôle de véritables condensateurs.

La théorie suppose encore la résistance de la pile absolument négligeable devant chacune des résistances du circuit, et la résistance intérieure d'une pile est un élément toujours mal défini.

Joignons à cela que si le condensateur est à anneau de garde, l'effet protecteur de celui-ci est toujours incomplet. La méthode ne permet pas, en effet, d'obtenir l'égalité de potentiel entre le collecteur et son système de garde, sans quoi l'expérience mesurerait la capacité totale du collecteur et de l'anneau. Cette circonstance fera donc perdre une partie des avantages que présente l'emploi de l'anneau de garde.

C'est pour les raisons qui précèdent que, dans nos propres recherches, nous avons adopté la méthode du galvanomètre différentiel, de préférence à celle du pont de Wheatstone.

Ces réserves faites, il est bon de dire que la méthode du pont, méthode de zéro, se prête très bien à des mesures précises, où les erreurs accidentelles doivent être faibles.

Dans la discussion des expériences faites par ce procédé, il va convenir d'attirer l'attention sur les parties délicates de l'installation : le condensateur (disposition,

distance des armatures), le commutateur (constance de la période, sa mesure), et, accessoirement, le circuit (isolement, température).

§ 5. — *Les expériences de J.-J. Thomson.*

Ces expériences ont été faites en deux séries : 1883 ⁽¹⁾, 1890 ⁽²⁾, toutes deux par la méthode du pont. Les dernières étant les plus soignées et, par conséquent, les plus exactes, nous nous en occuperons d'abord.

Le condensateur étalon est à armatures cylindriques (diamètres 23^{cm} et 25^{cm}). Le cylindre intérieur (longueur 60^{cm}) est prolongé par deux autres plus courts (longueur 10^{cm}) formant système de garde. Le tout est placé verticalement et les trois cylindres intérieurs reposent l'un sur l'autre par le moyen de petites cales d'ébonite (épaisseur 0^{cm}, 3). Les dimensions linéaires ont été mesurées avec grand soin en se servant d'un mètre étalonné ; quant à la distance des armatures (1^{cm}), on l'a déduite du poids d'eau pouvant remplir l'intervalle que laissent entre elles les armatures, tout l'air étant retiré avec une machine pneumatique. Deux déterminations distinctes de cette distance concordaient à $\frac{1}{3000}$.

Malheureusement des corrections importantes rendent cette précision un peu illusoire. Il y a :

1^o Correction pour l'écartement du collecteur et des anneaux de garde (elle atteint $\frac{1}{200}$) : on la calcule en assimilant les surfaces cylindriques à des surfaces planes. L'espace nuisible entre le collecteur et l'anneau de garde étant

(¹) J.-J. THOMSON, *On the determination of the number of electrostatic units in the electromagnetic unit of Electricity* (Phil. Trans., p. 707-721; 1883).

(²) J.-J. THOMSON et G.-F.-C. SEARLE, *A determination of the ratio of the electromagnetic unit of electricity to the electrostatic unit* (Phil. Trans., p. 583-621; 1890).

le tiers de la distance des armatures, cette correction du $\frac{1}{200}$ n'est peut-être exacte qu'à quelques dixièmes près de sa valeur.

2° Correction pour une différence de potentiel entre le collecteur et le système de garde. Le procédé du pont rend inévitable cette inégalité de potentiel; la correction ne dépasse pas $\frac{1}{1000}$, mais elle est tout à fait incertaine à cause de la présence des petits supports d'ébonite.

3° Correction pour l'ellipticité de la section des cylindres (voisine de $\frac{1}{2000}$).

4° Le cylindre collecteur n'est pas parfait, et l'on prend pour son diamètre la moyenne des mesures faites aux deux extrémités. Il faudrait encore ajouter que les génératrices ne sont peut-être pas absolument rectilignes, que les plans des bases ne leur sont peut-être pas absolument perpendiculaires.... Mais la plus grosse erreur possible est probablement dans la détermination de l'épaisseur. La mesure par les pesées, celle que l'on adopte, donne très exactement $0^{\text{cm}},94128$; les mesures directes au pied à coulisse donnent très exactement $0^{\text{cm}},94345$; la différence est de $\frac{1}{430}$. On se demande, en outre, quelle certitude on conserve en substituant, comme on le fait, à la moyenne des inverses des épaisseurs, l'inverse de l'épaisseur moyenne, alors que celle-ci varie au moins de $0^{\text{cm}},018$, soit de $\frac{1}{50}$.

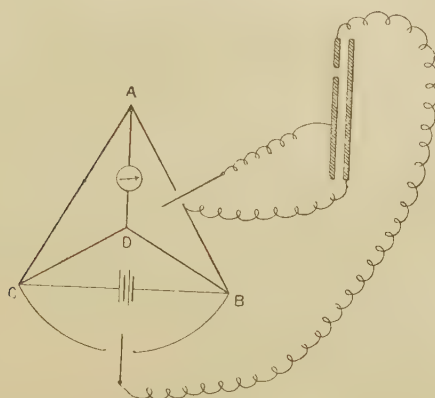
Il ne serait donc pas impossible qu'il y eût plus du millième de douteux sur la valeur adoptée pour la capacité :

397,927 unités électrostatiques.

Le commutateur actionne à la fois le plateau collecteur et l'anneau de garde. Deux anneaux de laiton échancrés, montés sur le même axe, sont en communication permanente, l'un avec le collecteur, l'autre avec le système de garde, et tournent devant des frotteurs qui chargent et

déchargent les conducteurs en les mettant successivement en communication avec A et B pour le collecteur, avec C et B pour le système de garde (*fig. 2*).

Fig. 2.



La rotation du commutateur est produite par une turbine à eau, et un aide rend le mouvement uniforme en agissant sur une vanne de commande pendant qu'un procédé stroboscopique lui permet de suivre à tout instant les variations de la vitesse.

La valeur de la période se déduisait de cette observation même. Le diapason employé dans l'observation stroboscopique donnait des battements comptés avec un autre diapason, et ce dernier avait été préalablement étalonné, en répétant une fois cette expérience alors que le commutateur était pourvu d'un enregistrement électrique.

Malgré le soin apporté dans cette partie de l'expérience, on n'a pas pu empêcher les oscillations de la vitesse d'atteindre le millième. Au reste, la sensibilité des appareils ne dépassait guère ce millième, puisque l'effet produit, en altérant la résistance CD de 2^w sur 3000, pouvait être observé.

Il est juste de signaler que tout était monté avec d'excellentes précautions, l'isolement du circuit soigneusement contrôlé et la valeur des résistances corrigée à chaque fois des variations de température, correction malheureusement toujours très douteuse. Ces variations de température pouvaient causer des courants thermo-électriques ayant quelque influence sur le galvanomètre; on n'en a pas tenu compte.

Il semble en résumé que chacune des déterminations auxiliaires pouvait donner à peu près le millième, et comme avec cela les vingt-trois expériences arrivent à s'écarter l'une de l'autre de $\frac{1}{500}$, il serait peut-être téméraire d'affirmer que le nombre définitif ne comporte qu'un seul millième de douteux. Ce nombre est

$$\nu = 299,55 \cdot 10^8.$$

La même méthode avait été employée pour les expériences de 1883, mais avec moins de précision. Tout d'abord, on ne tenait pas compte de la capacité des fils conducteurs et la correction correspondante fut en 1890 de $\frac{1}{69}$. De plus, l'auteur estimait que « le condensateur (étalon) ne pouvant pas être actionné par un commutateur à cause de l'anneau de garde, il était nécessaire de le comparer » à un autre condensateur dépourvu de système de garde, lequel servait ensuite pour les mesures. C'est évidemment une nouvelle cause d'incertitude. Le galvanomètre était aussi moins sensible, puisque la déviation non compensée était seulement de 120 divisions de l'échelle. Le commutateur était une lame vibrante entretenue électriquement qui établissait des contacts à mercure; il devait être suffisamment régulier, au millième sans doute. Les erreurs d'expérience, enfin, étaient encore de $\frac{1}{500}$. Le résultat numérique est

$$\nu = 296,3 \cdot 10^8.$$

L'écart avec la détermination de 1890 rentre largement dans la limite des erreurs possibles pour les expériences de 1883.

§ 6. — *Les expériences de Rosa* ⁽¹⁾.

(Méthode du pont.)

M. Rosa, qui travaillait au laboratoire de M. Rowland, s'est servi, pour ses mesures, du condensateur sphérique qu'avait fait construire celui-ci pour ses propres expériences. Les sphères étaient tournées avec le plus grand soin, les variations du diamètre (25^{cm}) ne dépassaient pas une quarantaine de microns. Des jaugeages à l'eau déterminaient leurs dimensions et un contrôle était fourni par une mesure directe faite avec un pied à coulisse étalonné.

La capacité eût alors été connue au delà du millième s'il n'avait pas fallu un ajustement rigoureux des deux hémisphères formant l'armature extérieure. Or M. Rosa estime que, dans cet ajustement, une erreur voisine du centième de millimètre était *possible* et l'erreur systématique alors *possible* sur la capacité est de l'ordre du millième. Le contact avec la sphère centrale est pris au moyen d'un fil passant par une ouverture de la sphère extérieure; l'auteur s'assure que fil et ouverture n'entraînent pas de perturbation appréciable. Cette même sphère intérieure, suspendue par un fil de soie, est centrée par des procédés micrométriques, mais le centrage n'a pas besoin d'être parfait, puisque l'on est au voisinage de la capacité minima.

On a, bien entendu, tenu compte de la capacité des fils

(¹) EDOUARD B. ROSA, *Determination of ν , the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit*. *John Hopkins University Baltimore, U. S. (Phil. Mag., t. XXVIII, p. 315-332; 1889-2)*.

conducteurs, qui se trouve un peu forte, pourtant, étant le $\frac{4}{11}$ de la capacité totale et n'étant pas déterminée avec plus de précision absolue que celle-ci.

C'est un diapason entretenu électriquement qui chargeait et déchargeait le condensateur au moyen de contacts platine-mercure. Le réglage de ce commutateur était délicat et difficile, et son fonctionnement quelque peu imparfait. Rosa a constaté, d'une part, que la période n'était pas exempte de variations, et, d'autre part, que la valeur de ν changeait lorsqu'on modifiait la période : toutes variations de l'ordre du millième.

L'isolement du circuit était assez satisfaisant; toutefois il y avait des déperditions quand le temps était humide; les expériences n'ont donc été faites que par le beau temps.

Les résistances subissaient des corrections du millième pour la température; mais on sait qu'on ne connaît jamais bien exactement la température d'une boîte de résistances. Aucune précaution n'était prise enfin pour éliminer les forces électromotrices thermo-électriques.

M. Rosa donne comme résultat définitif

$$\nu = 300.10^8,$$

à $\frac{4}{1000}$ près. Nous considérons ce $\frac{4}{1000}$ comme assez doux, d'autant plus que les 51 valeurs de ν trouvées sont comprises entre les limites éloignées

$$300,9 \quad \text{et} \quad 299,5.10^8.$$

Soit un écart maximum de plus de $\frac{4}{1000}$.

§ 7. — *Les expériences de Klémencic.*

M. le Dr Ignaz Klémencic a publié trois Mémoires sur ses mesures de ν .

Le premier travail, qui date de 1881 ⁽¹⁾, a eu simplement pour objet d'établir qu'il n'y avait pas de difficulté insurmontable à effectuer une détermination de φ par la méthode consistant à envoyer dans un même galvanomètre, d'abord les décharges périodiques d'un condensateur et, ensuite, une fraction convenable du courant de la pile de charge. On n'a fait que des expériences préliminaires, au centième; leur résultat (diminué de 7 pour 1000, afin de le réduire à la valeur de l'unité Siemens, $\frac{4.00}{106.25}$ au lieu de 0,955 admis par l'auteur) fut

$$\varphi = 302.10^8 (\pm 1 \text{ ou } 2 \text{ pour } 100).$$

Le second Mémoire, celui de 1884 ⁽²⁾, est le plus important. Il rend compte d'expériences faites, comme celles de 1881, par le procédé alterné, et d'autres pour lesquelles on s'est servi du galvanomètre différentiel.

Le condensateur employé est formé de deux disques d'acier (rayon, 21^{cm}), reposant l'un sur l'autre et séparés par de petites rondelles de verre. L'appareil est dépourvu de système de garde, mais distant d'au moins 2^m de tout corps conducteur. La capacité est calculée au moyen d'une formule de Kirchhoff, en prenant pour distance des armatures l'épaisseur moyenne des rondelles isolantes mesurées au sphéromètre.

C'est, il me semble, dans cette évaluation de la capacité qu'on risque surtout de voir se produire des erreurs systématiques notables. On observera, en effet, que :

(1) D^r IGNAZ KLEMENCIC, *Zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen dem electromagnetischen und mechanischen Einheit der Stromintensität* [Sitz. Ber. Wien (II), t. LXXXIII, p. 603; 1881]. Voir aussi *Carl's Repertorium*, t. XVIII, p. 505.

(2) D^r IGNAZ KLEMENCIC, *Untersuchungen über das Verhältniss zwischen dem electrostatischen und electromagnetischen Maasssystem* (Sitz. Ber. Wien., t. LXXXIX; 1884). Voir aussi *Exner's Rep.*, t. XX, p. 462; 1884.

1° En l'absence de tout dispositif de garde, la présence du sol à 2^m de distance augmente la capacité d'une fraction qui est peut-être $\frac{1}{400} \left(\frac{5^{\text{mm}}}{2^{\text{m}}} \right)$ lorsque l'écartement des armatures est de 5^{mm}.

2° Les deux plateaux sont séparés par trois rondelles de verre, qui augmentent encore la capacité d'une fraction qui est peut-être aussi $\frac{1}{400}$, si seulement ces rondelles ont 3^{mm} de rayon.

3° Il n'a point été fait de contrôle micrométrique de la bonne exécution des plans, et, pour les écartements de quelques millimètres dont on se sert, il eût fallu pouvoir presque répondre du micron.

4° La formule de Kirchhoff n'est certainement pas parfaite, et la correction qu'elle fournit pour l'influence des bords atteint une valeur considérable, $\frac{1}{10}$ de la capacité, d'autant plus douteuse que les deux disques n'ont pas rigoureusement le même diamètre.

5° On confond l'épaisseur de la lame d'air avec celle des plaques de verre, en sorte que l'on ne tient pas compte des couches d'air et de poussière qui peuvent s'interposer et augmenter l'épaisseur de plusieurs microns. Outre cela, les plateaux ne sont pas des plans géométriques, et, indépendamment des déformations d'ensemble, ils peuvent présenter des aspérités sensibles sur lesquelles porteront les rondelles, tout ceci conduisant à une évaluation trop faible de l'épaisseur.

Ces dernières causes d'erreur sont très sérieuses; elles sont d'ailleurs en sens inverse des deux premières, et, finalement, on ne peut pas dire quel est le signe des quelques millièmes qui restent douteux sur la valeur de la capacité.

Ajoutons que la correction pour la capacité des fils est énorme : elle est montée jusqu'à $\frac{1}{4}$ de la capacité totale; et cette correction ne peut jamais être très bien déterminée.

Le diapason interrupteur qui commandait le condensateur était entretenu électriquement et donnait environ soixante-cinq décharges par seconde. Son oscillation était assez régulière; pourtant, elle changeait encore de $\frac{1}{1000}$ d'une expérience à l'autre, comme le montrait la comparaison stroboscopique avec un diapason auxiliaire dont la période servait d'étalon. Cette période, l'étalon de temps, n'a pas été mesurée directement par l'auteur: on a simplement admis le nombre fourni par le constructeur (König), nombre que l'on a contrôlé, d'une manière très indirecte, par un procédé électrique qui exige la connaissance absolue d'une self-induction.... L'unité de temps n'est donc pas très bien connue.

Les résistances du circuit, comme celles du galvanomètre, avaient été comparées à l'unité Siemens, et, pour chacune des expériences, on faisait les corrections de température. Des mesures directes ont montré à Klémencic qu'il ne fallait pas se fier à ces corrections, puisque la résistance de l'une des bobines galvanométriques lui a parfois paru baisser, alors que la température extérieure s'élevait (écart, $\frac{1}{800}$). Rien n'a été fait pour éviter les courants thermo-électriques.

Le galvanomètre employé était un Wiedemann à deux bobines. Ce genre d'instrument peut rendre de bons services pour le procédé alterné; mais, une fois monté en différentiel, ce n'est plus un appareil symétrique, et il y a là un défaut évident.

Ce galvanomètre n'était d'ailleurs pas extrêmement sensible; et, pour cette raison, comme aussi à cause des variations de vitesse du commutateur, les différentes observations ont pu varier de près de $\frac{1}{100}$.

Les trente-quatre ν qu'a fournis le procédé alterné pour différentes valeurs de la capacité sont compris entre 300, 1 et 302, 9; les dix-sept valeurs trouvées par le procédé du

galvanomètre différentiel varient de 301,6 à 303,1; et la moyenne générale

$$\nu = 301,88 \cdot 10^8$$

comporte assurément un doute bien supérieur à $\frac{1}{2}$ pour 100.

Dans son troisième Mémoire ⁽¹⁾ (1886), Klemencic a appliqué les mêmes procédés à l'étude de la décharge partielle d'un grand condensateur à lame d'air dans une grande résistance (sulfate de zinc, environ 300 000 ohms).

« On ne peut pas, toutefois, attribuer à cette détermination de ν le même poids qu'à la précédente, car la méthode actuelle paraît moins précise. Les observations nécessaires sont bien plus nombreuses que par la première méthode, et même une partie seulement de ces mesures suffirait à la détermination de ν par les procédés antérieurs.... La présente méthode offre donc surtout cet intérêt de faire faire un pas de plus à l'étude de la décharge continue d'un condensateur. » Je ne vois rien à ajouter à ce que dit ainsi Klémencic de ses propres mesures. Si, au point de vue qui nous occupe, elles comportent au moins les mêmes causes d'erreurs systématiques que les précédentes, il faut pourtant signaler la remarquable concordance qu'elles présentent, les valeurs de ν restant comprises entre

$$300,9 \text{ et } 301,8. \quad \text{Moyenne... } 301,5 \cdot 10^8.$$

(1) Dr IGNAZ KLEMENCIC, *Untersuchungen über das Verhältniss zwischen dem electrostatischen und electromagnetischen Maasssystem*, II (*Sitz. Ber. Wien.*, t. XCIII, p. 470; 1886). Voir aussi *Exner's Rep.*, t. XXII, p. 568.

§ 8. — *Les expériences de Himstedt.*

Nous en avons trois séries datées de septembre 1886 ⁽¹⁾, octobre 1887 ⁽²⁾, avril 1888 ⁽³⁾. Les premières et les dernières mesures se rattachent à la méthode du galvanomètre différentiel, celles de 1887 à la méthode du pont. On s'est servi, pour les deux premières séries, d'un condensateur à plateaux métalliques circulaires; on ne l'a muni d'un anneau de garde que pour les expériences de 1888.

Les dispositifs de Himstedt reproduisent presque identiquement ceux qu'avait employés antérieurement Klémencic; ils prêtent donc aux mêmes remarques, aussi ne répéterons-nous pas ce que nous disions au sujet de l'erreur que peut introduire la capacité étalon ou le galvanomètre Wiedemann monté en différentiel. La correction pour la capacité des fils est toujours voisine de $\frac{1}{10}$. Le condensateur étant, en général, dépourvu d'anneau de garde, sa capacité n'est pas connue au millième. Un système de garde fut ajouté, en 1888, qui était formé d'une couronne en acier recouverte d'une boîte métallique. Mais, pour un disque collecteur de 25^{cm} de rayon, l'espace nuisible qui le sépare de l'anneau valait successivement 0^{mm}, 3; 1^{mm}, 3; 2^{mm}, 6, ce qui est beaucoup pour pouvoir répondre de la correction quand la distance des armatures était seulement tantôt 3^{mm}, tantôt 5^{mm}. D'ailleurs, collecteur et anneau de garde reposent toujours sur le plateau inférieur par des rondelles de verre; si Himstedt cherche à en tenir compte en attribuant au verre

⁽¹⁾ HIMSTEDT, *Ueber eine Bestimmung der Grösse ν* (Wiedemann *Annal.*, t. XXIX, p. 560; 1887. — Septembre 1886).

⁽²⁾ HIMSTEDT, *Ueber eine neue Bestimmung der Grösse ν* (Wiedemann *Annal.*, t. XXXIII, p. 1; 1888. — Octobre 1887).

⁽³⁾ HIMSTEDT, *Ueber die Bestimmung des Capacitäts eines Schutzringcondensators in absoluten electromagnetischen Maasse* (Wiedemann *Annal.*, t. XXXV, p. 126; 1888. — Avril 1888).

un pouvoir inducteur spécifique égal à 6, cette correction reste peu sûre; et comme, en outre, la distance des armatures est encore assimilée à l'épaisseur des rondelles, la capacité calculée est probablement trop forte, et aussi la valeur de ν , peut-être de quelques millièmes.

L'interrupteur à diapason est étalonné par comparaison directe avec une horloge astronomique au moyen d'une roue phonique qu'actionne le courant interrompu par ce diapason. Contrairement à l'opinion de Lord Rayleigh ⁽¹⁾, Himstedt déclare qu'il est possible d'obtenir d'excellents résultats avec un semblable interrupteur, en prenant la précaution de donner une grande stabilité aux supports et de rendre les oscillations des deux branches absolument symétriques. Il faut, toutefois, surveiller de très près le fonctionnement de l'appareil qui reste d'un emploi difficile. Dès la vitesse de 100 vibrations par seconde, des à-coups indiquent l'incertitude des contacts.

Le condensateur, comme tout le circuit, était remarquablement bien isolé. Toutes les mesures ont été faites vers 20°, température de l'étalonnement des résistances; et, si rien encore n'a été fait contre les perturbations thermo-électriques, au moins, toutes les déterminations secondaires sont-elles, en général, concordantes au $\frac{4}{5000}$. Les erreurs accidentelles des mesures principales n'ont pas fait varier les résultats de plus de $\frac{3}{1000}$.

Voici maintenant les résultats pour lesquels nous substituons, comme toujours, 106,25 aux valeurs de l'ohm 106,01 et 106,08 qu'avait successivement adoptées Himstedt.

Première série (1886).

Galvanomètre différentiel, condensateur dépourvu de garde.

Valeurs extrêmes. 299,98–300,98 Moyenne. 300,40.10⁸.

⁽¹⁾ Lord RAYLEIGH, *On Prof. Himstedt's determination of the ohm* (*Phil. Mag.*, t. I, p. 10-13; 1886-1).

Deuxième série (1887).

Pont de Wheatstone, même condensateur.

Valeurs extrêmes. 300,3–300,87 Moyenne. 300,56.10⁸.

Troisième série (1888).

Galvanomètre différentiel, anneau de garde.

Valeurs extrêmes. 300,57–301,53 Moyenne. 300,99.10⁸.

Moyenne générale :

$$\nu = 300,65.10^8.$$

Nous réunirons en un Tableau l'ensemble des résultats numériques relatifs aux déterminations de ν . Les pages indiquées correspondent aux analyses que nous en donnons dans ce travail.

Pages.	Auteurs.	Dates.	Valeurs de ν .	
14	Weber et Kohlrausch....	1856	299,6	à 322,6 .10 ⁸
23	Maxwell	1668	280,3	290,7 »
21	W. Thomson et King....	1869	271,4	288,0 »
25	Branly	1872		
19	Mac Kichan.....	1873	286,3	299,9 »
31	Ayrton et Perry.....	1879	295,2	297,5 »
16	Rowland.....	1879	295,02	301,82 »
21	Shida	1880	294,0	296,3 »
32	Stoletow	1881	298,0	300,0 »
40	Klémencic.....	1881	299,9	307,0 »
22	Exner.....	1882	287,0	»
38	J.-J. Thomson.....	1883	296,3	»
41	Klémencic.....	1884	300,1	303,1 »
44	Klémencic.....	1886	300,9	301,8 »
45	Himstedt.....	1886	299,98	300,98 »
45	Himstedt.....	1887	300,31	300,87 »
45	Himstedt.....	1888	300,57	301,53 »
39	Rosa.....	1889	299,5	300,9 »
35	J.-J. Thomson.....	1890	299,55	»
23	Pellat.....	1891	300,78	»

Et la conclusion de cette étude historique, déjà longue, sera que la valeur numérique de la constante ν ne paraît pas avoir été déterminée, jusqu'ici, avec assez de précision pour que l'on puisse répondre du millième.

C'est cette précision que j'ai cherché à atteindre dans les mesures dont l'exposé constitue la deuxième Partie de ce travail.

DEUXIÈME PARTIE.

LA METHODE. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.

Dans les expériences dont nous allons rendre compte, on a exclusivement employé la méthode qui consiste à mesurer une capacité de forme connue en employant le galvanomètre différentiel.

Voulant avoir plus du $\frac{1}{4000}$ sur la valeur de ν , on a dû rejeter les procédés qui nécessitent des mesures ne comportant pas cette précision. On devait donc, en premier lieu, s'interdire toute mesure de force électromotrice, puisqu'il ne semble pas que les électromètres absolus permettent encore de dépasser le $\frac{1}{500}$. On ne devait pas non plus employer le galvanomètre balistique proprement dit, qui, comme on sait, n'est guère un instrument de précision, en raison de l'incertitude qui règne sur l'époque de la décharge, sur l'uniformité du champ, sur la constance du magnétisme de l'aiguille, et principalement sur la loi de l'amortissement lors des brusques impulsions ⁽¹⁾. Nous avons cru devoir renoncer aussi aux mesures de déviations permanentes qui supposent au champ

⁽¹⁾ Lord RAYLEIGH, *Experiments to determine the value of unit of resistance* (*Phil. Trans.*, t. II, p. 619; 1882).

magnétique une constance et une uniformité dont on peut difficilement répondre, alors surtout qu'on a eu soin d'en réduire autant que possible l'intensité pour donner au galvanomètre sa sensibilité maxima.

Si l'on accepte toutes ces restrictions, il ne reste plus qu'à choisir entre les mesures de capacités par le pont de Wheatstone ou par le galvanomètre différentiel. Les raisons que nous en avons données plus haut (p. 33), nous ont fait adopter le dernier procédé.

Il n'est pas nécessaire de beaucoup insister sur les avantages pour ainsi dire négatifs de cette méthode : méthode de régime permanent et méthode de zéro ; indépendante des variations de la pile de charge, elle ne nécessite la connaissance absolue ni de l'oscillation d'un barreau aimanté, — ni d'une torsion, — ni d'une impulsion, — ni d'un amortissement, — ni d'un champ magnétique, — et ne suppose enfin ce champ ni constant ni uniforme. A cela, il faut ajouter ce que nous avons dit ailleurs, qu'en fait la quantité mesurée est ν^2 , et que la valeur de ν n'est plus affectée que de la moitié des erreurs commises, tant dans les expériences elles-mêmes que dans les déterminations de l'ohm.

Par contre, dans l'application de cette méthode, il faut : mesurer avec précision les dimensions d'un condensateur ; — rendre absolument régulière et mesurer la vitesse d'un commutateur ; — comparer des résistances à l'ohm légal ; — déterminer enfin le coefficient d'un galvanomètre différentiel. Nous verrons qu'avec une machine à diviser, une horloge et un bon galvanomètre, on peut faire tout cela avec une précision suffisante.

Une question assez grave se pose : *quand un courant discontinu agit sur l'aiguille aimantée, les forces en jeu sont-elles en tout semblables à celles qu'exerce un courant continu de même intensité moyenne ?*

Il pourrait se produire une première perturbation due à des charges statiques agissant par attraction sur l'aiguille aimantée qui est isolée en vertu de son mode de suspension. Je ne pense pas qu'il en soit ainsi, car le système mobile est protégé contre ce genre d'actions par la monture métallique des bobines. Au reste, une série de mesures vient à l'appui de cette appréciation; la valeur trouvée pour ν n'a, en effet, pas changé lorsque l'on a déséquilibré le galvanomètre pour rapprocher autant que possible les aimants et les bobines.

On peut encore craindre autre chose. Le champ magnétique que la décharge instantanée crée dans le galvanomètre atteint, pendant un temps très court, une intensité considérable : dans nos expériences le courant de décharge commence avec une intensité de l'ordre du $\frac{1}{10}$ ampère, et il circule dans un très grand nombre de spires. Le petit aimant placé perpendiculairement à ce champ intense peut prendre une aimantation transversale temporaire; et, ce qu'il faut craindre, c'est que le champ extérieur, c'est-à-dire sensiblement le champ terrestre, n'agisse sur cette aimantation parasite, et ne dévie indûment l'aiguille. Si cela était, le coefficient actuel du différentiel ne serait plus égal à celui que l'on mesurera, comme on le verra plus loin, au moyen de courants très faibles, et les expériences se trouveraient faussées.

Je puis heureusement affirmer que, dans les conditions des expériences dont nous rendons compte, la variation correspondante ne porte pas sur plus du $\frac{1}{25000}$.

Disons tout d'abord que, par mesure de précaution générale, le système astatique était réglé à peu près perpendiculairement au méridien magnétique. Cela explique pourquoi l'action terrestre a pu être insensible sur une aimantation transversale, même notable. Mais voici l'expérience qui l'établit.

On a d'abord mesuré le coefficient k du galvanomètre

au moyen d'un courant continu de quelques millièmes d'ampère; puis on a substitué à ce courant le courant discontinu produit par la décharge du condensateur, le commutateur fonctionnant à toute vitesse et la pile de charge étant doublée. La valeur trouvée pour k n'a pas varié de $\frac{1}{42500}$ (peut-être $\frac{1}{2}$ de douteux sur 63000). Or, si la perturbation dont nous parlons avait quelque influence, l'effet produit serait ici doublé puisque le courant parcourt les deux circuits *dans le même sens*, et produit ainsi des aimantations transversales de même sens. De là résulte que l'erreur possible, de ce chef, pour l'expérience principale, est bien réellement inférieure à $\frac{1}{25000}$.

Il me semble que l'objection de principe se réduit dès lors à ceci : *L'action purement magnétique d'un courant sur un aimant permanent reste-t-elle la même, soit que l'on ait affaire à un courant continu de l'ordre du millième d'ampère, soit que ce courant, débitant toujours la même quantité d'électricité, devienne discontinu, son intensité maximum pouvant alors atteindre le $\frac{1}{10}$ d'ampère?*

Il ne nous appartient pas de répondre à cela, car c'est précisément l'hypothèse fondamentale sur laquelle s'appuie la mesure galvanométrique des courants instantanés.

Et c'est avec ces quelques réserves que nous allons exposer maintenant nos expériences.

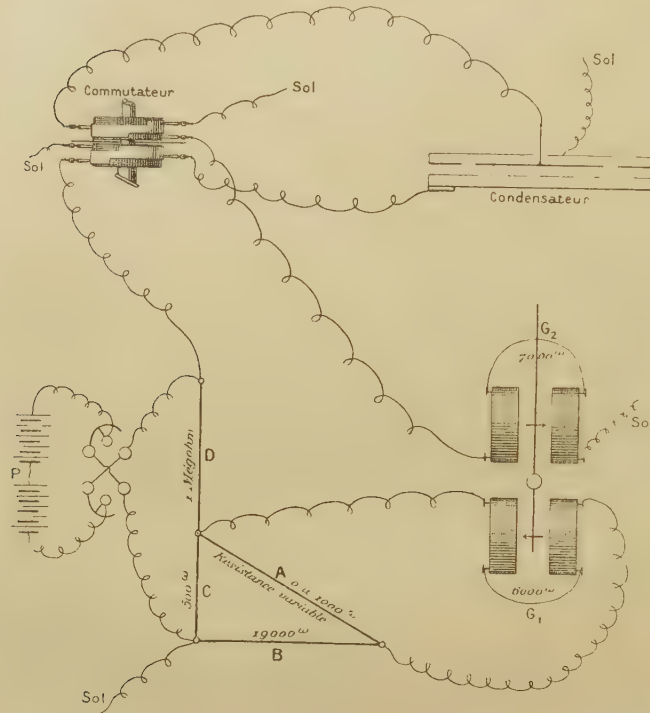
Le dispositif général est donné par la *fig. 3*.

Le courant principal, fourni par une pile ⁽¹⁾ de quelque 110 volts, P, passe par un renverseur à 6 godets, circule dans un mégohm D, suivi de la résistance C qui vaut

(1) Environ 80 éléments Gouy très soigneusement isolés à la paraffine et que la *fig. 4* représente en $\frac{2}{3}$ de grandeur d'exécution.

500 ohms, et retourne à la pile. L'un des fils du galvanomètre $G_1 = 6000^\omega$, shunté par la résistance variable A , fait partie d'un circuit qui, contenant encore un lest B de 19000^ω , est en dérivation sur C .

Fig. 3.

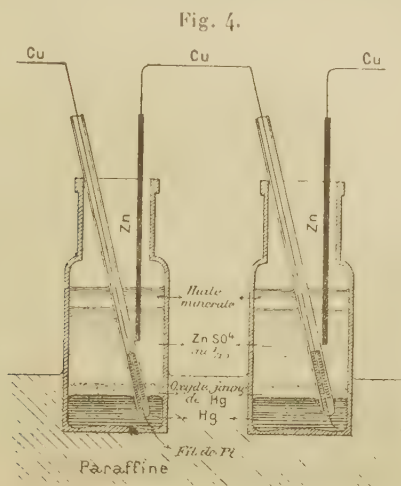


Grâce à cette combinaison de résistances (un *double shunt*) la petite fraction i_1 du courant principal I , qui passe dans G_1 , sera bien connue; son expression est

$$i_1 = I \frac{AC}{A(G_1 + B + C) + G_1(B + C)}.$$

Le second fil, G_2 , est traversé, n fois par seconde, par le courant de décharge que lui envoie le commutateur. Les

communications sont établies de manière que le potentiel prenne alternativement, sur l'armature inductrice du con-



densateur, les valeurs qu'il possède aux deux pôles de la pile, dont l'un est au sol.

Y a-t-il lieu de tenir compte de la diminution du courant principal I , résultant de ce que la pile P doit ainsi fournir un nouveau courant discontinu destiné à charger l'inducteur? Non. Ce courant discontinu est, en effet, presque égal au courant i_1 , c'est-à-dire, pour nos mesures, à environ $\frac{1}{4000}$ de I . On peut donc raisonner comme pour le cas où l'on établirait sur la pile une dérivation D' de 1000 mégohms. Soit alors P la résistance intérieure de cette pile, le coefficient de réduction de I serait

$$\frac{C + D}{D'} \frac{P}{C + D + P}.$$

Or, ici, $C + D$ vaut 1 mégohm, D' en vaut 1000, P est bien inférieur à 20000. Le courant principal est donc altéré

de moins de $\frac{4}{50000}$. Et nous pouvons continuer les calculs comme si ce courant restait le même.

Représentons alors par c la capacité utile du condensateur en unités électrostatiques.

Il passe dans G_2 un courant dont l'intensité moyenne i_2 est, en unités électromagnétiques,

$$i_2 = \frac{nc}{v^2} (D + C) I,$$

puisque le potentiel de charge est $(D + C)I$.

Nous commettons bien une nouvelle erreur en négligeant la dérivation B, A, G_1 ; mais cette erreur, encore inférieure à $\frac{4}{50000}$, est précisément dans le sens qui convient pour réduire l'erreur précédente.

Lorsque l'équilibre du galvanomètre sera atteint, ce que l'on constatera par un renversement du courant I , on devra avoir, en représentant par k le coefficient actuel du différentiel,

$$i_1 = k i_2,$$

c'est-à-dire

$$\frac{AC}{A(G_1 + B + C) + G_1(B + C)} I = k \frac{nc}{v^2} (D + C) I,$$

d'où

$$v = \sqrt{nc k \frac{D + C}{C} \frac{A(G_1 + B + C) + G_1(B + C)}{A}}.$$

Mais, dans l'expérience ainsi conduite, à la capacité c du condensateur s'ajouterait celle du commutateur et des fils conducteurs. Pour éliminer cette capacité parasite, qu'il ne nous a pas été possible de réduire absolument à zéro, on répétera la même mesure, le plateau collecteur étant détaché du fil de communication.

Soit A' le shunt très court qu'il faut alors employer; il est facile de s'assurer que la formule de tout à l'heure doit être transformée en celle-ci

$$v = \sqrt{nc k \frac{D + C}{C} \frac{\{A(G_1 + B + C) + G_1(B + C)\} \{A'(G_1 + B + C) + G_1(B + C)\}}{(A - A')G_1(B + C)}},$$

et la correction est légitime parce que l'effet perturbateur des fils est bien uniquement d'ajouter la charge induite qu'ils peuvent prendre à la charge induite d'autre part sur le collecteur.

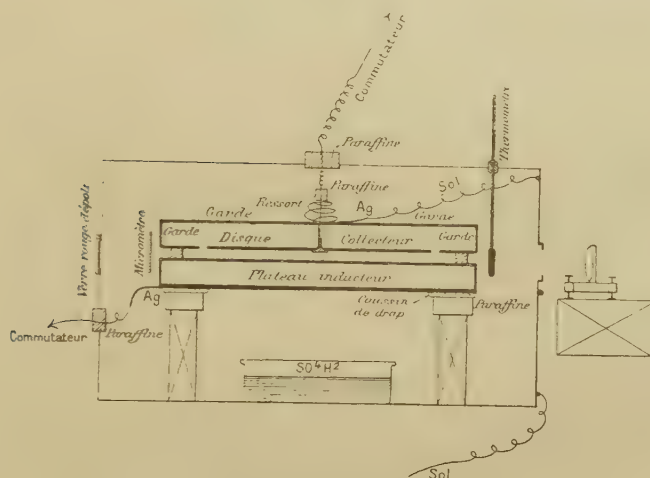
Prenons maintenant en particulier chacune des parties de l'appareil.

LE CONDENSATEUR.

C'est un condensateur à plateaux avec anneau de garde. Il est placé dans l'atmosphère desséchée d'une enceinte métallique reliée au sol.

Les surfaces conductrices sont constituées par l'argen-

Fig. 5.



ture de deux dalles circulaires en glace de Saint-Gobain, épaisses de 23^{mm}, d'un diamètre de 35^{cm}. La totalité des surfaces, dessus, dessous et bords, est argentée, en sorte que le verre n'intervient pas dans les phénomènes élec-

triques et sert seulement de support rigide aux couches d'argent ⁽¹⁾.

L'un des plateaux, l'armature inductrice, repose, par l'intermédiaire de coussins de drap, sur des supports en paraffine. Sur la face travaillée de l'autre, un trait circulaire sépare un disque collecteur de tout le reste de l'argenture qui lui sert de système de garde, protégeant ainsi ses deux faces contre les actions extérieures.

Avant toute argenture, les faces utiles des dalles ont été travaillées en verres d'optique par les procédés ordinaires de retournement, en se servant d'une dalle auxiliaire semblable, et les retouches ont été continuées jusqu'à ce qu'un sphéromètre qui donnait plus du micron ne décelât plus de défaut ⁽²⁾. On a alors constaté qu'entre deux quelconques des plans de verre, on n'observait sur toute la partie utile que quelques franges d'interférences, bien rondes.

On pouvait alors répondre de près du micron dans l'exécution des plans. Il n'était pas nécessaire d'aller plus loin.

On a alors argenté les glaces avec les mêmes précautions que pour les miroirs de télescopes, puis l'argent a été doucement poli ⁽³⁾.

Il fallait séparer le collecteur du système de garde : il a suffi de placer le plateau argenté sur une machine à diviser les cercles, et, avec un burin chargé d'un poids de 200^{gr} labourant l'argenture, on a creusé un sillon circulaire d'environ 22^{cm} de diamètre mettant le verre à nu. Le trait

⁽¹⁾ Voir G. LIPPMANN, *Sur une unité de temps absolu, étalons électriques de temps et chronoscopes des variations* (*Journal de Physique*, p. 261; 1887).

⁽²⁾ Le travail des plans de verre a été fait par M. Werlein.

⁽³⁾ M. Léon Laurent, le constructeur bien connu, a eu l'obligeance de comparer, avec ses plans étalons, deux des plans qui nous ont servi après leur argenture. Il les a trouvés l'un convexe, l'autre concave, de 6 et de 8 franges (2^μ, 8 et 1^μ, 4) pour la partie utile; les deux surfaces étaient donc applicables l'une sur l'autre à environ 0^μ, 6 près; les bords étaient sensiblement moins bons.

obtenu s'est trouvé avoir juste $0^{\text{mm}},1$ de large et ses bords étaient nets sans bavures (¹).

Deux lames d'argent soudées à des fils de cuivre prennent le contact avec le plateau inducteur et le système de garde. La dalle qui porte le collecteur est percée en son centre d'un trou de $2^{\text{mm}},5$ de diamètre, évasé en cône vers la face travaillée. Un obturateur en argent le ferme exactement et met le plateau collecteur en communication avec les instruments de mesure par l'intermédiaire d'un fil de cuivre qui traverse la dalle, et qui, fixé dans un petit tube de paraffine est tendu légèrement par un ressort à boudin. Pour assurer absolument le contact, l'obturateur est pourvu d'un rebord de $0^{\text{mm}},1$ d'épaisseur s'appuyant sur la face plane. L'obturateur avec son rebord est sans doute une cause d'erreur pour le calcul de la capacité; mais, comme la correction ne porterait que sur le $\frac{1}{3000}$ de la surface et sur $\frac{1}{70}$ de l'épaisseur, il n'y a pas lieu d'en tenir compte.

L'ensemble du collecteur et du système de garde, qui en forme le prolongement, est séparé du plateau inducteur par trois rondelles isolantes, placées sous l'anneau de garde afin de ne pas altérer la capacité utile. Ce sont des rondelles de quartz (parallèles à l'axe) que l'on a travaillées ensemble pour leur donner même épaisseur, au micron près.

L'isolement par le quartz, contrôlé à l'électroscope, a été trouvé excellent. Par contre, le sillon circulaire qui isole le collecteur présente une certaine conductibilité;

(¹) Le trait une fois tracé, il y avait encore communication métallique entre les deux parties de l'argenture. L'examen au microscope a fait découvrir un fil d'argent formant pont conducteur à travers le sillon. C'était une éraillure où n'avait pas pénétré le burin d'acier. L'isolement a été rétabli en grattant ce reste d'argent avec une aiguille à cataracte. La régularité du disque collecteur a été ainsi altérée, mais sur une étendue de $2^{\text{mm}},1$ ou $3^{\text{mm}},1$, heureusement assez faible pour qu'on la pût négliger.

mais, en mettant le système en dérivation sur un mégohm, la conductibilité de celui-ci n'a pas varié du $\frac{1}{80000}$ de sa valeur. La résistance d'isolement est donc supérieure à 80 milliards d'ohms. C'est plus qu'il n'en fallait pour les mesures, car, d'après l'ordre de succession des contacts, l'isolement n'est nécessaire que pendant la décharge du collecteur à travers les 7000 ohms du galvanomètre, c'est-à-dire à travers une résistance au moins 10 millions de fois plus faible. Aucune fraction sensible du courant de décharge ne peut dès lors traverser le ruban de verre, malgré la grande self-induction du galvanomètre.

Toutes les dimensions linéaires du condensateur ont été mesurées avec une bonne machine à diviser, que l'on a préalablement étalonnée en mesurant avec la machine les décimètres successifs d'un mètre étalon. On a trouvé que le pas était très régulier pour la partie médiane de la vis; et comme les pointés ont été faits avec une précision de 2 ou 3 μ , on peut considérer le pas de vis comme connu en chaque point à environ $\frac{1}{50000}$.

Le mètre étalon employé était le *mètre normal* du Bureau international des Poids et Mesures, que M. Benoît, directeur du Bureau, avait bien voulu mettre à ma disposition. M. Benoît eut même l'obligeance de me prêter son précieux concours pour l'exécution des mesures d'étalonnement; je suis heureux de pouvoir lui adresser ici tous mes remerciements.

Le diamètre du collecteur a été mesuré dans 4 azimuts à 45° , en pointant aussi exactement que possible le milieu du sillon isolant. Les pointés ont pu se faire à 4 ou 5 microns près. On a trouvé, pour les 4 diamètres (mesures faites à $19^\circ, 2^\circ\text{C.}$ et réduites à 20°C.) :

21^{cm},8198,

21^{cm},8190,

21^{cm},8185,

21^{cm},8179.

On a considéré le collecteur comme parfaitement circulaire, ayant d'ailleurs un diamètre égal à la moyenne des quatre nombres ci-dessus :

$$21^{\text{cm}}, 8188,$$

ce qui correspond à une surface de

$$373^{\text{cm}^2}, 898,$$

et j'estime que ces mesures font connaître la valeur de la surface avec une précision voisine de $\frac{1}{20\,000}$.

Il était plus délicat de mesurer exactement la distance des armatures et c'était peut-être la partie la plus difficile de tout notre travail.

Le problème à résoudre était celui-ci. Déterminer, à un micron près, la distance moyenne des deux surfaces conductrices, cette détermination devant se faire sur l'appareil en place, au moment même de chaque mesure définitive.

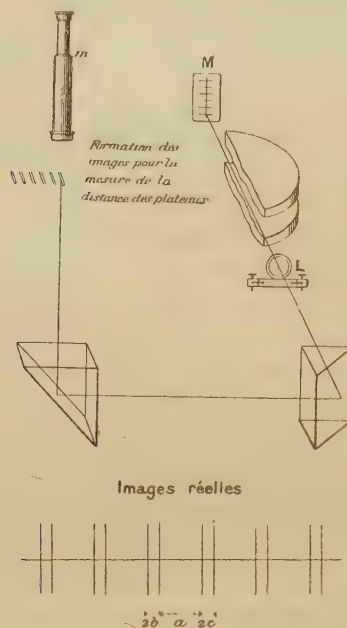
Voici la solution adoptée :

Vis-à-vis de l'intervalle des deux plateaux, on a placé une lame de verre portant une graduation très délicatement gravée et, par des procédés de réglage faciles à imaginer, son plan a été rendu perpendiculaire à celui des plateaux, et ses traits ont été placés parallèlement à cette direction. Ce réglage peut se faire avec une grande précision, qui n'est d'ailleurs pas nécessaire, l'écart qui peut subsister ne produisant qu'une erreur du second ordre sur les mesures.

Les disques argentés constituent d'excellents miroirs plans qui donnent une série d'images du micromètre. Les rayons lumineux, recueillis par une lentille achromatique L (*fig.* 6), sont renvoyés par deux prismes à réflexion totale (beaux prismes de quartz de 65^{mm} d'arête) le long de la machine à diviser où ils vont former des

images réelles. Un microscope à réticule porté par le chariot de la machine, et qui donne le micron, permet de pointer ces images et d'en mesurer les distances ⁽¹⁾.

Fig. 6.



Et tout cela est collé à l'arcanson sur des supports massifs en chêne ou en fonte, fixés au sol et alourdis encore par des gros blocs de ciment.

La distance δ de deux traits consécutifs du micromètre est un peu inférieure à l'écartement e des plateaux ; elle en diffère d'une fraction voisine de $\frac{1}{3}$. C'est en réalité cette *fraction* seule, que l'on mesure avec la machine à

(¹) On a évité toute aberration chromatique dans l'ensemble des réfractions en n'opérant jamais qu'en lumière monochromatique (lampe à incandescence et verre rouge).

diviser, et le grossissement, voisin de $\frac{4}{3}$, du système formé par la lentille et les prismes, s'élimine ainsi de lui-même.

On mesure donc sur les images réelles les distances $2b$, $2c$ et a (image de l'intervalle δ des traits du micromètre), et l'on a, pour l'écartement des plateaux,

$$e = \delta \left(1 + \frac{b+c}{a} \right);$$

on opère de même sur les images successives et l'on prend la moyenne.

Ce procédé optique tient compte d'une flexion des disques, flexion toujours *possible*, bien qu'une étude préalable au sphéromètre ait montré qu'elle était insensible; on tient compte aussi des déformations d'ensemble que causent les variations de température.

La méthode comporte un contrôle précis de la bonne exécution des surfaces planes : la *netteté* d'une surface réfléchissante est, en effet, deux fois plus grande que la *netteté* des images qu'elle produit. Et comme les images réelles, amplifiées encore par le grossissement de la lentille L, étaient pointées chacune à 1 ou 2 microns près, c'est, en définitive, à moins de 1 micron que se réduit l'incertitude sur la distance mesurée.

L'écartement des plateaux étant de 7^{mm} , c'est une erreur possible de $\frac{1}{7000}$ au plus. Mais porterait-on même du simple au double, l'erreur ainsi commise sur e , cela ne ferait jamais sur ν qu'une erreur du $\frac{1}{7000}$, car il faut se rappeler que c'est ν^2 que l'on mesure. Une partie de cette erreur pourra même disparaître dans les moyennes, puisque la détermination de l'épaisseur e est faite pour chaque série d'expériences.

Notons, enfin, que la surface que nous faisons intervenir est la *surface optique moyenne* des plateaux, qu'il y a tout lieu de considérer comme identique à leur *surface électrique moyenne*, celle qu'il aurait fallu envisager.

J'ai pu constater que, d'un jour à l'autre, et surtout après chaque démontage du condensateur, la distance des armatures pouvait varier de plusieurs microns; c'est assez dire qu'il serait tout à fait illusoire de la confondre avec l'épaisseur des lames de quartz qui séparent les deux plateaux.

Voici maintenant quelques nombres à l'appui de ce qui précède.

La distance des traits extrêmes du micromètre sur verre, mesurée à plusieurs reprises *au micron sûr* avec la machine à diviser, pour la température de 20° environ à laquelle était toujours le condensateur, est, en microns,

$$5710^{\mu}, 0.$$

Le Tableau suivant donne les lectures du tambour de la machine à diviser pour deux déterminations de e , faites coup sur coup (expérience du 30 avril).

Tous les pointés se font en éclairant le micromètre en lumière rouge et par transparence, afin que les traits apparaissent en noir sur fond lumineux.

(Le tambour de la machine à diviser porte 400 divisions; le pas est de $\frac{1}{2}$ millimètre).

	Première mesure.	Seconde mesure.
	tours div	tours div
	0. 30	0. 32
Réflexions sur l'armature inférieure. {	3.158	3.161
	18.291	18.296
Le micromètre vu directement..... {	22.126	22.129
	37.234	37.237
	40.362	40.367
Réflexions sur l'armature supérieure. {	56. 91	56. 94
	59.327	59.329
Valeur correspondante de e en microns..... {	6998 μ , 3	6998 μ , 3

L'examen de ces nombres témoigne d'une sphéricité

sensible des plateaux argentés; elle correspond à un peu plus d'un micron pour la partie centrale, comme l'avait indiqué l'examen des franges d'interférences. La manière même dont est obtenue l'épaisseur moyenne fait que l'on tient compte, dans une large mesure, de cette petite imperfection des plans.

Avec la largeur attribuée à l'anneau de garde, $6^{\text{cm}}, 5$, et grâce à l'existence de l'argenture postérieure du disque de verre, la protection du collecteur est complète; la correction due à l'influence des bords, calculée pour une épaisseur de la lame d'air supposée égale à 1^{cm} , tombe au-dessous du $\frac{1}{50\,000}$: on n'en tiendra pas compte. On aura encore une précision bien suffisante en substituant, comme on l'a fait, au rayon du collecteur, ce même rayon augmenté de la demi-largeur du sillon isolant, puisque cette largeur n'est qu'environ la $\frac{1}{2200}$ partie du diamètre du collecteur, tout en n'étant que la $\frac{1}{70}$ partie de la distance des armatures.

Aussi, pour chaque valeur de la distance e des plateaux, a-t-on pu prendre pour la capacité, en unités électrostatiques, l'expression théorique

$$c = \frac{S}{4\pi e}$$

sans faire aucune correction, S étant la surface utile du collecteur

$$S = 373^{\text{cmq}}, 898 \text{ à } 20^{\circ}.$$

LE COMMUTATEUR.

La méthode exige un commutateur, fonctionnant d'une manière régulière, chargeant le condensateur et le déchargeant ensuite dans le galvanomètre.

Je n'ai pas employé de diapason entretenu électriquement.

Outre que la complexité des communications à établir

eût nécessité deux appareils rigoureusement synchrones, ce qui pourtant n'eût pas été une difficulté insurmontable, j'ai craint qu'avec des instruments aussi délicats on ne pût pas avoir une entière confiance dans la fixité de la période et dans la qualité des contacts.

Après avoir inutilement essayé des appareils à bascule qui cessaient de bien fonctionner dès la vitesse de cinq périodes par seconde, j'ai adopté un commutateur tournant analogue à celui de J.-J. Thomson. L'ordre de succession des contacts est alors absolument certain, et l'on peut donner à la rotation une régularité qui, pendant la durée d'une mesure, soit comparable à celle des diapasons entretenus électriquement.

Pour atténuer, autant que possible, les déperditions dans le condensateur et les influences électriques étrangères, il convient de laisser constamment au sol le système de garde et d'établir les communications dans l'ordre suivant :

Tout le condensateur étant au sol :

1° L'INDUCTEUR est mis en communication avec la pile de charge; le collecteur, qui communique directement au sol, se charge par influence.

2° Le COLLECTEUR est mis en communication avec le sol, non plus directement, mais par l'intermédiaire du galvanomètre; il reste chargé.

3° L'INDUCTEUR, immédiatement après, est mis au sol; le collecteur se décharge dans le galvanomètre.

4° Le COLLECTEUR est mis directement au sol.

1° *bis*. L'INDUCTEUR, immédiatement après, est mis en communication avec la pile de charge, etc., etc.

De cette manière, le système de garde est au même potentiel que le collecteur; celui-ci n'est jamais isolé avec sa charge; on donne aux périodes de charge et de décharge la plus grande durée possible; le sol et les conducteurs voisins, enfin, sont sans aucune action.

Monté directement sur l'axe d'une machine Gramme d'un cheval (1) un cylindre d'ébonite porte deux bagues en laiton qui tournent devant un système de six frotteurs; elles sont en connexion métallique permanente, l'une avec le collecteur, l'autre avec l'inducteur et établissent les communications voulues en temps opportun.

La pièce d'ébonite est creusée d'un profond sillon afin de bien séparer les deux bagues métalliques et d'en assurer l'isolement. Cet isolement, contrôlé avec le mégohm, comme pour le condensateur, a été trouvé satisfaisant.

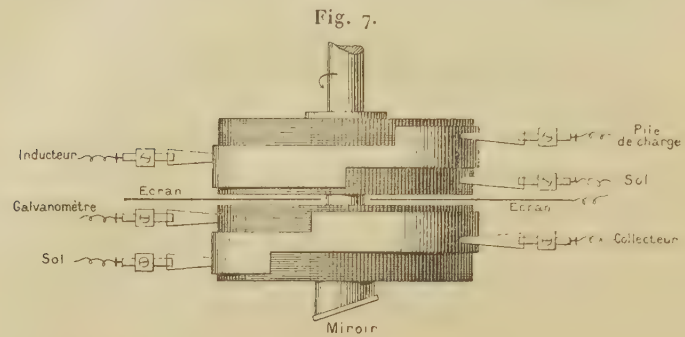
Un écran conducteur au sol, qui pénètre dans le sillon sans toucher aux pièces mobiles, protège l'une des bagues contre l'influence électrique de l'autre.

Les deux anneaux de laiton, montés à force et chevillés sur le cylindre d'ébonite, sont en relief de 2^{mm} à 3^{mm}. Les frotteurs, qui les effleurent, ne viennent donc jamais toucher cette ébonite : on en voit sans peine tous les avantages. On a tourné et poli ces deux bagues sur place, la dynamo servant à la fois de tour et de moteur.

La *fig. 7* montre tout cela en projection horizontale; la position du commutateur correspond au début de la période de charge. On y a joint (*fig. 8*) le profil d'un frotteur. C'est un ressort de laiton battu tout à fait flexible (longueur 6^{cm}, largeur à l'extrémité 5^{mm}, épaisseur 0^{mm}, 15) qu'un contre-ressort plus robuste (épaisseur 0^{mm}, 5) empêche de vibrer dans son ensemble; l'amortissement est achevé par un étouffoir en caoutchouc, simple fragment

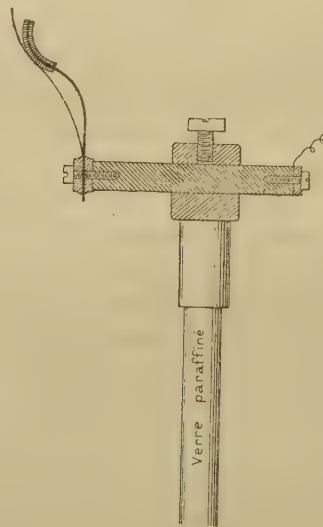
(1) Cette machine m'a été fort obligeamment prêtée par M. Hippolyte Fontaine, directeur de la Société Gramme. C'est un moteur, type cylindrique, qui avait déjà servi aux expériences de M. Miculescu sur l'équivalent mécanique de la chaleur et qui avait, alors, été soigneusement équilibré. J'ai profité de ce réglage et, après une mise en état des coussinets, la machine a fonctionné très régulièrement sans faire trépidation la grande table de chêne sur laquelle on l'avait fortement boulonnée, et cela malgré les 2000 tours à la minute qu'on lui demandait.

de tube qui coiffe le contre-ressort. A chaque tour du commutateur, l'anneau mobile vient frôler tangentiellement



l'extrémité du ressort, le faisant fléchir d'une fraction de millimètre, et le contact est établi sans frottement sensi-

Fig. 8.



ble. Une glissière et des vis de serrage servent au réglage du frotteur; une colonne de verre paraffiné à chaud

(longueur 15^{cm}, diamètre 1^{cm},4) le supporte et lui procure un isolement pratiquement parfait.

On peut toujours craindre que le commutateur ne soit une source d'erreurs systématiques.

Il se pourrait qu'en raison du voisinage immédiat de la dynamo des phénomènes d'induction se produisent dans les conducteurs mobiles et que, le frottement de l'air intervenant encore, le condensateur acquière une charge parasite. L'expérience a prouvé qu'il n'en était rien. Après avoir, en effet, supprimé la pile de charge et à peu près quadruplé la capacité du condensateur en réduisant son épaisseur à 2^{mm}, on a fait fonctionner le commutateur à toute vitesse (50 tours à la seconde) et l'on n'a constaté aucun courant de décharge appréciable. Il faut observer d'ailleurs que ces effets, qui doivent sans aucun doute exister, quoique très faibles, s'élimineront d'eux-mêmes dans les mesures, puisque l'on opère non par équilibre simple, mais par renversement du courant principal.

Un inconvénient plus sérieux est dû à la capacité du commutateur et du fil qui le relie au plateau collecteur. Pendant la période de charge, ce fil et la bague mobile correspondante subissent l'influence électrostatique de ceux des conducteurs qui communiquent avec la pile, et l'électricité ainsi induite s'ajoutera, pendant la période de décharge, à l'électricité du condensateur. Il fallait atténuer ces influences : c'est à cela que sert l'écran au sol, situé entre les deux anneaux du commutateur ; c'est encore à cela que sert un tube de verre, garni extérieurement de papier d'étain au sol, qui entoure, sans le toucher, le fil en question et le protège jusqu'au voisinage immédiat du condensateur.

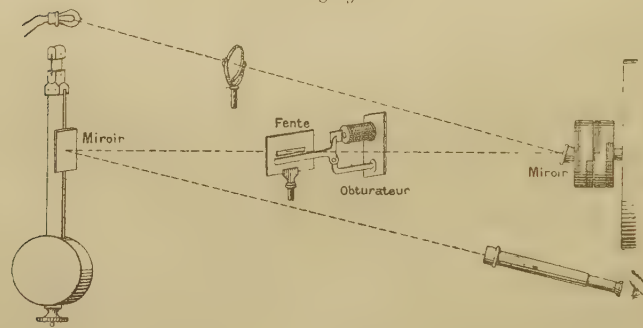
La capacité parasite n'a pas pu être réduite à moins de $\frac{6}{10}$ d'unité électrostatique (capacité d'une sphère isolée de 6^{mm} de rayon), alors que la capacité du condensateur

est de l'ordre de 50 de ces unités. Nous avons vu plus haut, à propos de la formule générale, comment on fait la correction. Mais il faut faire une remarque importante : c'est que la mesure électromagnétique de la petite capacité parasite se fait avec plus de précision *absolue* que la mesure principale, les inévitables variations de vitesse n'ayant ici aucune influence ; en sorte que l'erreur relative que cette correction peut entraîner sur le résultat définitif est notablement inférieure aux erreurs accidentelles qui resteraient possibles, alors même que toute capacité étrangère serait rigoureusement supprimée.

C'est en faisant appel à la méthode stroboscopique que l'on a pu régulariser et mesurer exactement la vitesse de rotation du commutateur.

Le dispositif adopté dérive de celui que M. Lippmann a proposé, il y a quelques années, pour la comparaison directe de deux pendules. La représentation schématique en est donnée par la *fig. 9*. Une fente horizontale est

Fig. 9.



éclairée un instant à chaque tour du commutateur au moyen d'un miroir oblique qui tourne avec lui ; ces éclairs, réfléchis par un miroir plan fixé au pendule d'une petite

horloge ⁽¹⁾, sont observés à l'aide d'une lunette au point sur la fente. Lorsque le pendule oscille, les images de la fente se multiplient, et, à chaque seconde ⁽²⁾, on en voit deux ou trois dans le champ. Ces images resteront immobiles si le commutateur fait un nombre entier de tours pendant une oscillation double du pendule. C'est cette immobilité qu'il faut atteindre.

Un aide observera donc constamment la marche des images et ralentira le mouvement de la machine, pour les obtenir et les conserver immobiles; il lui suffira d'appuyer légèrement les doigts sur l'axe, et le frottement de ce frein si simple, qu'il pourra modifier à son gré, lui permettra de régler exactement la vitesse. L'observation est facilitée en éclairant le champ de la lunette par une lampe placée excentriquement.

Le courant très constant qui actionne le moteur est fourni par une batterie de grands accumulateurs; on leur prend à peu près 2 ampères sous une force électromotrice de 25 volts. On règle tout d'abord l'intensité du courant de manière à avoir une vitesse supérieure d'environ $\frac{1}{200}$ à celle que l'on cherche, on voit alors les images remonter doucement dans le champ : on les arrête en agissant sur l'axe.

(¹) Petite horloge à poids, battant la demi-seconde, marchant une heure, pourvue d'un contact électrique fonctionnant à chaque seconde. Elle appartient au Collège de France et a servi autrefois à Regnault.

(²) C'est en réalité toutes les demi-secondes que l'on devrait voir les images, à l'aller et au retour du pendule; mais l'observation serait alors pénible, les deux systèmes d'images semblant toujours se déplacer en sens inverse. Aussi en supprime-t-on la moitié. Un pendule auxiliaire battant aussi la demi-seconde est entretenu par l'horloge avec une différence de phase d'un quart d'oscillation, et ce pendule à son tour commande électriquement un obturateur qui masque la fente pendant une demi-seconde à chaque oscillation du pendule.

J'ai été très utilement aidé pour cette installation, ainsi que pour une partie des mesures, par M. G. Hodin; j'ai grand plaisir à lui en exprimer mes affectueux remerciements.

Il est bien certain que l'on n'arrive pas à une régularité absolue, et les images de la fente se déplacent toujours un peu. Leur oscillation ne dépasse pas, en quatre ou cinq secondes, le $\frac{1}{20}$ de l'intervalle de deux images, ce qui correspond à $\frac{1}{20}$ de tour du commutateur; et, puisque en général on opère à une vingtaine de tours par seconde, c'est tout au plus une variation du $\frac{1}{2000}$ autour de la vitesse moyenne. C'est encore beaucoup, et plus, assurément, que ne donnerait un système vibrant; mais il me semble que cet inconvénient est racheté par la confiance que l'on peut avoir dans un organe purement mécanique pour établir les communications. Enfin, s'il est vrai que la vitesse varie, on connaît du moins rigoureusement la vitesse moyenne.

On ne peut donc répondre que du $\frac{1}{2000}$ sur la vitesse du commutateur; c'est principalement cela qui limite la précision des mesures et la concordance des expériences. On peut établir l'équilibre au galvanomètre avec une précision un peu supérieure. On emploie toujours, en effet, pour charger le condensateur, un nombre d'éléments suffisant pour qu'une variation de $\frac{1}{200}$ (1 ohm sur 200 ou 300) dans l'ajustement des résistances corresponde à un déplacement de cinq divisions de l'échelle lors du renversement du courant. Il serait plutôt nuisible de chercher une sensibilité supérieure, car on ne peut guère espérer établir l'équilibre avec plus de précision que n'est définie la vitesse même du commutateur. Les variations de vitesse de la dynamo causent, en outre, des variations du champ magnétique qui entraînent de petits déplacements du zéro atteignant une demi-division de l'échelle: le pointé se fait donc au quart de division.

Les résultats numériques des expériences sont strictement conformes aux affirmations qui précèdent. Que l'on veuille bien se reporter aux Tableaux qui sont donnés à la fin de ce Mémoire, on y verra qu'en général les valeurs

de ν , faisant partie d'une même série, ne diffèrent pas de la moyenne correspondante de plus de $\frac{1}{3000}$.

On arrive à la valeur de ν au moyen des déterminations électriques lorsqu'on connaît la vitesse de rotation du commutateur. Mais le problème peut être renversé, et si l'on considère alors ν comme connu, le dispositif électrique conduit à la mesure absolue de la vitesse de rotation. On a tout au moins les valeurs relatives des vitesses en laissant indéterminée la valeur de ν .

Donnons un exemple.

La première colonne du Tableau ci-dessous donne les valeurs de

$$\frac{A}{A + \frac{G_1(B+C)}{G_1+B+C}},$$

qui doivent être proportionnelles aux vitesses. La seconde colonne donne le nombre entier qui résulte de la mesure stroboscopique, et la troisième colonne donne le rapport des nombres des deux premières colonnes, qui devrait être constant :

Expérience du 27 avril 1892.

Vitesses (unités arbitraires).		
Méthode électrique.	Méthode stroboscopique.	Rapports.
0,044691	18	0,0024828
0,047171	19	0,0024827
0,062113	25	0,0024845

Dans le Mémoire que nous avons déjà cité, M. G. Lippmann (1) indiquait comment le dispositif employé peut conduire à des déterminations absolues de vitesses, ainsi que nous le disions tout à l'heure; et l'auteur observait

(1) G. LIPPMANN, *Journal de Physique*, p. 261; 1887.

aussi que l'appareil, employé comme *chronoscope des variations*, était susceptible d'une sensibilité pour ainsi dire illimitée. Nous avons pu, en effet, constater nous-mêmes que l'observateur placé au galvanomètre suivait très exactement les variations de vitesse; il a suffi de renforcer la pile de charge et d'augmenter la capacité du condensateur pour rendre nettement sensibles des variations de l'ordre du $\frac{1}{100\,000}$.

Il restait à déterminer la valeur absolue de la période et, pour cela, deux choses étaient à connaître : le nombre entier de tours que fait le commutateur pendant une oscillation du pendule, et la durée absolue de cette oscillation.

Pour ne pas avoir à craindre une charge ou une décharge incomplète du condensateur, on n'a pas dépassé quarante périodes par seconde. Il n'y a dès lors aucune difficulté à connaître ce nombre entier, soit qu'on le calcule en adoptant provisoirement une valeur approchée de ν , $3 \cdot 10^{10}$, soit que l'on cherche les valeurs qui rendent comparables les résultats d'une même série. La réduction en fraction continue du rapport des vitesses, telles que l'appareil les mesure en unités quelconques, permet d'arriver rapidement au résultat. Dans l'expérience du 27 avril, que nous rapportons plus haut, le rapport des vitesses $\frac{0,062113}{0,047171}$ a pour premières réduites

$$1, \quad \frac{4}{3}, \quad \frac{25}{19};$$

25 et 19 sont les entiers cherchés.

La valeur absolue de l'oscillation du pendule s'obtient par comparaison avec une horloge astronomique (*) pourvue d'un contact électrique permettant de transmettre la

(*) Horloge construite par Winnerl. Le contact électrique a été récemment installé par A. Fénon : c'est un double ressort très léger que

seconde. Cette horloge avait été réglée sur le temps solaire moyen en prenant l'heure à plusieurs reprises, par téléphone, à l'Observatoire de Paris : sa *marche* ne dépasse pas une à deux secondes par jour, la durée de l'oscillation de son pendule est donc l'étalon C.G.S. de temps à moins de $\frac{1}{45000}$.

Les secondes des deux horloges s'enregistrent dans un chronographe à deux plumes-siphons, appareil intermédiaire entre un double récepteur Morse et un double siphon recorder, dont le mouvement d'horlogerie déroule 1^{cm} de papier par seconde (¹).

L'enregistrement se fait avant et après chaque expérience, il dure de trois à cinq minutes, et l'on relève ultérieurement les indications de l'appareil avec une lunette à réticule. Comme on peut avoir dans les pointés à peu près le $\frac{1^{\text{mm}}}{100}$, c'est-à-dire le millième de seconde, c'est-à plus du $\frac{1}{100.000}$ que l'on détermine le rapport des périodes. Sa variation, pendant la durée d'une expérience, ne portait bien que sur le chiffre des cent-millièmes.

Voici, par exemple, les mesures du 30 avril 1892 :

		Horloge		Période
		de	astrono-	de l'horloge
		Regnault.	mique.	de
				Regnault.
1 ^{er} enregistrem.	{ 1 ^{re} coïncidence	2,3	2,3	1,03711
(3 ^h 10 ^m).	{ 9 ^e »	217,9	225,9	
2 ^e enregistrem.	{ 1 ^{re} coïncidence	2,1	2,1	1,03715
(3 ^h 52 ^m).	{ 12 ^e »	298,2	309,2	

On a, pour ce jour-là, adopté la moyenne $1^{\text{s}},03713$.

Le pendule abaisse d'une fraction de millimètre chaque fois qu'il passe dans la verticale.

La période est la durée d'une oscillation double : en fait, notre unité de temps est donc *deux secondes*.

(¹) Ce chronographe à deux plumes-siphons est un instrument de précision construit par A. Fénon.

LES RÉSISTANCES.

Je me suis servi de quatre boîtes de résistances :

La résistance D (voir *fig.* 3) est un mégohm (Carpentier, n° 2924-2), appartenant au laboratoire d'enseignement de la Sorbonne, et que M. Bouty a eu l'obligeance de me prêter pour ces expériences.

C est pris sur une boîte linéaire (Carpentier, n° 1047-10), valeur nominale 502^{ω} .

B et A, les éléments principaux de la mesure, font partie d'un pont à décades (Carpentier, n° 1486-8), prolongé par une décade de dixièmes d'ohms (Carpentier, n° 3982-1). B a pour valeur nominale 19000^{ω} , A varie de 200^{ω} à 400^{ω} ; et l'on apprécie le $\frac{1}{2}$ dixième d'ohm sur A.

Le mégohm D est mesuré pour chaque expérience : aussi le conserve-t-on simplement dans la caisse en bois qui sert à son transport; les fils y pénètrent par deux petits tubes de paraffine.

Quant aux autres boîtes de résistances, leur étalonnement en valeurs relatives est fait une fois pour toutes, et il convient de les soustraire autant que possible aux variations de température. On les a donc placées au fond d'une caisse faite en planches de sapin de 1^{cm} et profonde de 35^{cm} . La caisse est doublée intérieurement d'une feuille de laiton et garnie à l'extérieur d'une épaisse couche de feutre et de drap. On la ferme par un couvercle également doublé de laiton, et, pour manœuvrer les chevilles, on soulève un volet qui, au repos, masque une fenêtre percée dans le couvercle. La variation diurne de la température à l'intérieur de la caisse est inférieure à 1° . Un cristalliseur contenant de l'acide sulfurique dessèche l'atmosphère. Les fils conducteurs passent dans des tubes de paraffine qui traversent les parois.

Il y avait lieu de craindre des forces électromotrices thermo-électriques dans toutes les parties utiles du circuit où la force électromotrice principale tombe au-dessous du volt. Aussi, pour ces portions du circuit, toutes les communications sont-elles établies au moyen de fils d'un même laiton (les bornes des appareils étant en laiton) et les contacts de ces fils se font au mercure dans des tubes de verre, toujours groupés par paire, pour l'égalisation des températures. Aucun effet thermo-électrique n'est alors sensible au galvanomètre.

Tous les fils de communication sont rigoureusement isolés par le moyen de supports en paraffine ou de supports Mascart.

On a négligé la résistance de ces fils devant les résistances principales; et, pour rendre cette approximation légitime, on a eu soin de toujours faire en sorte que les résistances négligées fussent inférieures à $\frac{1}{20000}$ des résistances utiles.

A chaque mesure on a comparé toutes les résistances à l'ohm légal par l'intermédiaire du pont à décades.

Le mégohm D (*fig. 3*) n'entre dans les formules (*voir* p. 54) que par son rapport $\frac{D}{C}$ à la résistance C de 502^ω. C'est ce rapport que l'on détermine par la méthode du pont de Wheatstone.

La résistance C n'entre plus alors que par le terme $B + C$, et comme B est quelques 38 fois supérieur à C, il suffit d'introduire dans ces termes une valeur de C exacte au $\frac{1}{2000}$: on a pris la mesure qui avait été faite une fois pour toutes, toujours avec le pont à décades n° 1486-8.

La résistance G_1 du galvanomètre sera, elle aussi, évaluée en fonction de l'unité moyenne du pont à décades n° 1486-8, et pour avoir toutes les résistances en ohms vrais il n'y a plus qu'à comparer l'ohm vrai et cette unité moyenne.

C'est pour y arriver qu'à chaque expérience on s'est

servi du pont pour mesurer un ohm étalon. On a pris toutes les précautions, maintenant classiques, que nécessite cette mesure : les communications sont établies par de grosses barres de cuivre (12^{mm} de diamètre) qui pénètrent dans les flacons de l'ohm au moyen des contacts Benoît, représentés par la *fig. 10*, qui suppriment les

Fig. 10.



forces électromotrices parasites. La résistance des barres et des contacts est prise à part en remplaçant l'ohm étalon par une éprouvette pleine de mercure où plongent à la fois les deux contacts. On a pu constater alors que la protection de la boîte à décades était suffisante, car la valeur de son unité moyenne ne variait jamais que de quelques dix-millièmes.

L'étalon employé est l'ohm n° 53 que le Bureau international des Poids et Mesures avait étudié pour le laboratoire de l'École Normale. Voici le certificat qui nous a été fourni :

« L'étalon secondaire de résistance, en verre et mercure, Benoît n° 53, a été comparé par M. de Nerville, en août, septembre et octobre 1890, avec les étalons princi-

paux du Bureau international des Poids et Mesures, comparés eux-mêmes avec les étalons prototypes du Ministère des Postes et Télégraphes. Sa valeur était, à cette date, à la température de la glace fondante, de 0,999 357 ohms légaux. »

Nous avons simplement adopté cette valeur. La correction de température a été faite au moyen de la formule

$$R = R_0(1 + 0,0008649t + 0,00000112t^2)$$

de MM. Mascart, de Nerville et Benoît; la température est donnée par un thermomètre étalon (Tonnelot, n° 4259), plongeant dans l'eau du vase qui renferme l'ohm. Les variations de température de l'ohm sont réduites par l'emploi d'une couche protectrice de feutre disposée autour de ce vase.

On a enfin ramené toutes les mesures de résistances à l'ohm vrai en *admettant* que cet ohm vrai est de 106^{cm},25 de mercure :

$$\text{ohm légal} = \frac{106}{106,25} \text{ ohm vrai.}$$

Dans ces mesures, le galvanomètre employé est celui-là même qui sert à l'expérience principale; on dispose seulement les fils conducteurs de manière que les deux paires de bobines se fassent suite dans le circuit.

Le courant nécessaire aux mesures de résistances est fourni par un seul élément Leclanché; des résistances auxiliaires réduisent ce courant pour qu'aucun échauffement des résistances ne soit à craindre et le galvanomètre reste assez sensible pour que la mesure d'une résistance se fasse encore au $\frac{1}{50000}$.

Il est à peine besoin de dire que le pont à décades (n° 1486-8), auquel sont rapportées toutes les mesures, a été soigneusement étalonné. Les rapports mutuels des résistances en ont été déterminés au delà du $\frac{1}{20000}$, mais l'inégalité des coefficients de variation avec la température

ne permet pas de répondre de plus du $\frac{1}{40000}$. Il en résulte que les mesures de résistances dont nous parlions tout à l'heure, quoique comportant une sensibilité du $\frac{1}{50000}$, n'atteignent, en réalité, que la précision, d'ailleurs suffisante, du $\frac{1}{40000}$.

LE GALVANOMÈTRE.

C'est un Thomson à deux paires de bobines, construit par Carpentier; il est à fil fin et sa résistance totale est d'environ 13000 Ω .

Le fil du galvanomètre est en cuivre; sa résistance est donc très sensible aux variations de température et il a fallu le protéger. Outre la cloche de verre cylindrique ordinaire, on a employé une cage en laiton de 1^{mm}, qui enveloppe complètement le galvanomètre et n'est percée que des ouvertures strictement nécessaires pour le passage de la lumière et des quatre fils conducteurs. De l'acide sulfurique dessèche l'air dans les deux enceintes. Le tout est placé dans un angle obscur de la salle et repose, par trois épaisses plaques de caoutchouc, sur une console fixée à l'un des murs principaux du bâtiment. De l'autre côté du mur sont des jardins et l'on est assez loin des rues pour que l'aiguille reste bien immobile tant que le temps n'est pas orageux.

On opère par réflexion; le miroir du galvanomètre est concave et a 1^m de rayon. Il donne une image réelle d'une échelle horizontale sur verre dépoli, graduée en quarts de millimètre: on observe cette image avec un viseur à réticule. Échelle et viseur sont à environ 1^m du galvanomètre; le grossissement du système optique est voisin de 15, et la lecture du quart de division est tout à fait facile.

En réduisant le champ magnétique avec l'aimant mobile, on a donné une durée de vingt-huit secondes à l'oscillation du système astatique suspendu par un fil de coton long de 6^{cm}. Dans ces conditions, un déplacement d'un

quart de division de l'échelle correspond à un courant d'à peu près un quarante-milliardième d'ampère, c'est-à-dire une variation de l'ordre du microvolt, pour la force électromotrice aux bornes du galvanomètre.

Le galvanomètre est, d'après cela, sensible aux forces thermo-électriques; aussi ne communique-t-il aux autres appareils que par des fils de laiton.

Une lampe à incandescence de quelques bougies éclaire l'échelle, et son action sur le galvanomètre est annulée par une bobine compensatrice que parcourt le même courant. Disons enfin que l'observateur a sous la main les touches d'un amortisseur électrique double avec lequel il arrête, en quelques secondes, les oscillations de l'aiguille.

Lorsque le galvanomètre sert comme différentiel, la paire de bobines supérieure forme le circuit G_2 , la paire inférieure forme l'autre, G_1 . On a ainsi deux circuits bien indépendants, un appareil bien symétrique et bien défini, et il n'y a d'ailleurs pas lieu de craindre une torsion du système mobile : le couple qui agit est trop faible.

Il est nécessaire de connaître, pour chaque expérience, le coefficient k du galvanomètre et la résistance G_1 des bobines inférieures.

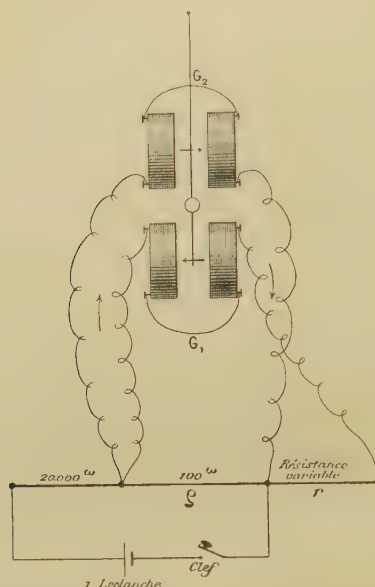
On détermine k en quelques minutes par le procédé que représente la *fig. 11*. Les circuits G_1 et G_2 sont tous deux en dérivation sur une centaine d'ohms, ρ , que traverse le courant d'un Leclanché, convenablement réduit par une résistance auxiliaire de 20.000^{ohms}. Le galvanomètre est disposé en différentiel, et l'on modifie la résistance variable r , que l'on a ajoutée à G_1 , de manière que l'aiguille reste immobile lorsque l'on ferme le circuit du Leclanché.

Il est clair que, ce réglage atteint, le coefficient du galvanomètre est

$$k = \frac{G_2}{G_1 + r}.$$

A vrai dire, cette valeur est seulement exacte pour les intensités actuelles des courants. On peut toutefois conserver sans modification le résultat obtenu, qui est, pratiquement, constant. On a fait, en effet, varier ces intensités en modifiant ρ et l'équilibre a persisté; il a fallu

Fig. 11.



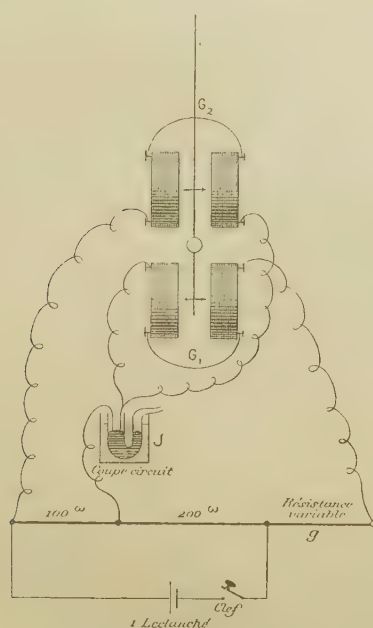
faire monter la force électromotrice aux bornes du galvanomètre à $\frac{1}{3}$ de volt pour changer k de $\frac{1}{40000}$; ce coefficient peut donc être considéré comme une constante pour les courants au moins cent fois plus faibles, que l'on emploie, tant dans l'expérience principale, que dans la mesure de k . La précision de cette mesure est de $\frac{1}{20000}$.

La formule donnant k nous montre que c'est non seulement G_1 , mais aussi G_2 qu'il faut connaître.

Le dispositif adopté pour la mesure de ces deux résis-

tances est donné par la *fig. 12*. Deux branches consécutives d'un pont de Wheatstone sont précisément G_1 et G_2 , les branches opposées étant 200^ω et 100^ω (leur rapport

Fig. 12 (¹).



est exactement 1,99688). On ajoute à G_1 une résistance variable g_1 pour conserver l'équilibre du pont quand on ferme le circuit en J. On a alors

$$G_1 + g_1 = 1,99688 G_2.$$

On répète l'expérience en permutant les résistances G_1 et G_2 ; g_1 devient g_2 et l'on écrit

$$G_2 + g_2 = 1,99688 G_1,$$

équations qui donnent G_1 et G_2 .

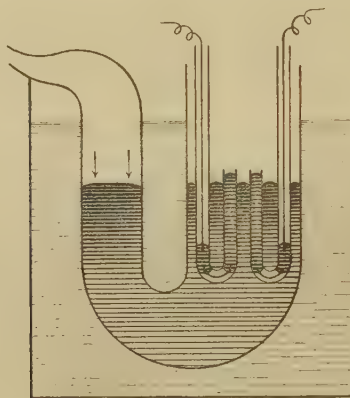
(¹) Le circuit de Leclanché contient encore une résistance de 20000^ω .

On a soin de faire circuler le courant dans G_1 et G_2 comme pour un montage différentiel, et l'image de l'échelle ne sort pas du champ. On conserve cependant toute la sensibilité du galvanomètre ; car, si le réglage est imparfait, la dérivation qui s'établit en J porte sur la totalité des courants de G_1 et G_2 , et non sur leur différence. En fait, la sensibilité est du $\frac{1}{20000}$.

La force électromotrice aux bornes du galvanomètre n'est guère que $\frac{1}{100}$ de volt : il est donc de toute nécessité que le coupe-circuit J n'introduise aucune force thermo-électrique. On a employé, dans ce but, un appareil dont j'emprunte la description à un travail antérieur fait en collaboration avec M. Chassagny ⁽¹⁾.

Les fils à réunir pénètrent dans les grandes branches de deux tubes en J contenant du mercure (*fig. 13*). Un fil de

Fig. 13.



platine, gros et court, soudé dans le verre, traverse la courbure du J et en fait communiquer les deux branches.

(¹) CHASSAGNY et ABRAHAM, *Sur l'emploi des couples thermo-électriques* (*Annales de Chimie et de Physique*, 1892).

Ce système de tubes est à l'intérieur d'un tube en U, contenant aussi du mercure, et plongé dans un vase plein d'eau acidulée; une pression d'air ferme le circuit par déplacement du mercure. On s'est assuré que la communication s'établit sans introduire une force électromotrice atteignant le $\frac{1}{20}$ de microvolt.

La constante k , comme les résistances G_1 et G_2 , changent d'un jour à l'autre. Les variations de k sont assez faibles et dépassent rarement le $\frac{1}{1000}$; G_1 et G_2 , au contraire, peuvent varier de $\frac{1}{100}$; le rapport $\frac{G_2}{G_1}$ reste assez constant.

On a trouvé, par exemple,

Le 28 avril 1892.... $G_1 = 6024^{\Omega, 1}$ $G_2 = 6766^{\Omega, 1}$ $\log k = 0,0191316$

Le 30 avril 1892.... $G_1 = 6008^{\Omega, 4}$ $G_2 = 6748^{\Omega, 2}$ $\log k = 0,0191369$

G_1 et G_2 sont, comme on l'a dit, exprimées en fonction de l'unité moyenne Ω du pont à décades; les nombres ci-dessus sont comparables, parce que cette unité n'a pas sensiblement varié du 28 au 30 avril.

LES MESURES DÉFINITIVES.

Une expérience complète, avec toutes les mesures accessoires, dure près de deux heures, dont la moitié est employée à la partie principale: établir l'équilibre du différentiel pour les décharges périodiques du condensateur.

On commence par mettre en activité tout le dispositif, dynamo, pendules, lampes; et, quelques minutes après, on procède à un premier enregistrement du temps.

Ceci fait, on passe à l'expérience principale, que l'on répète trois fois, pour des vitesses variant du simple au double. Après chacune de ces mesures et pour la même vitesse, on fait la détermination des capacités parasites.

Aussitôt après, on enregistre à nouveau la seconde des deux horloges.

Sans rien arrêter, la dynamo et les lampes à incandescence continuant à fonctionner, on fait la détermination de k ; la constante du différentiel que l'on a ainsi est bien celle qui convient à l'expérience principale, sans aucune altération du champ magnétique : on pourrait se tromper de $\frac{1}{5000}$ sur k si l'on arrêta la dynamo.

C'est maintenant le tour des résistances : on mesure d'abord G_1 et G_2 , puis l'ohm étalon, enfin le mégohm, et l'on en profite pour contrôler l'isolement du condensateur et du commutateur.

Entre temps, on a fait, à la machine à diviser, les pointés nécessaires pour déterminer la distance des armatures du condensateur.

Quand toutes les parties de l'appareil eurent été étudiées et définitivement installées, on put obtenir des séries concordantes. Ce furent d'abord les expériences I et II. Après ces mesures, on a démonté le commutateur, qui a été réglé à nouveau, et l'on a effectué la troisième série. Le galvanomètre, à son tour, a alors été visité : on a retiré et retourné les bobines, changé les fils de communication et déréglé l'horizontalité de manière à placer le système astatique aussi excentriquement que possible.

Pour la dernière série de mesures (série V) on a utilisé un autre condensateur, différant peu du nôtre et qui a été construit pour le laboratoire de M. Bouty. La sphéricité des disques est encore un peu plus faible que pour les nôtres, l'anneau de garde est plus large, le diamètre du disque collecteur est réduit à

$$19^{\text{cm}}, 8231 \text{ (à } 20^{\circ}\text{)};$$

la largeur du sillon isolant est aussi plus petite : c'est

$$0^{\text{cm}}, 0080;$$

l'isolement a été contrôlé et trouvé aussi bon que pour le premier condensateur.

Ces dernières expériences ont été faites en doublant presque le voltage de la pile de charge : on s'est servi de 160 éléments Gouy.

Comme toutes ces séries de mesures étaient concordantes, on s'en est tenu là.

Nous donnons maintenant les résultats numériques des expériences.

Dans les Tableaux qui suivent, on a employé les notations suivantes :

n = le nombre de tours du commutateur pour une oscillation du pendule ;

θ, θ' = la durée de cette oscillation en secondes ;

A = la valeur de la résistance A (*fig. 3*), lorsqu'on équilibre le courant de décharge du condensateur ;

A' = la valeur de A lorsque le commutateur fonctionne à vide (capacités parasites) ;

k = la constante du galvanomètre ;

G_1, G_2 = les résistances des deux circuits du galvanomètre ;

t = la température de l'ohm étalon ;

Ω = l'unité moyenne du pont à décades ;

D = le mégohm (*fig. 3*) ;

C = la résistance fixe d'environ 502^ω (*fig. 3*) ;

B = la résistance fixe d'environ 19000^ω (*fig. 3*) ;

e = l'écartement des armatures du condensateur, exprimé en *microns*.

Toutes les résistances sont données corrigées d'après l'étalonnement du pont à décades.

SÉRIE I (27 avril 1892).

Mesures principales.

	<i>n.</i>	<i>A.</i>	<i>A'.</i>
1°.....	18	$215,24^{\Omega}$	$4,01^{\Omega}$
2°.....	19	227,78	4,16
3°.....	25	304,71	5,50

$$\theta = 1^{\circ},03747, \quad \theta' = 1^{\circ},03694 \text{ (}^1\text{)}.$$

Mesures accessoires.

$$\begin{aligned} \log k &= 0,0190758, & t &= 13^{\circ},63, \\ \log \frac{\Omega}{\text{ohm vrai}} &= 1,9998192, \\ G_1 &= 6024^{\Omega}, 1, & \frac{D+C}{C} &= 19974,3, \\ G_2 &= 6766^{\Omega}, 6, & e &= 7000^{\mu}, 6. \end{aligned}$$

$$\text{Constantes..} \left\{ \begin{array}{l} B = 18975^{\Omega}, 2, \\ C = 500^{\Omega}, 8, \\ \text{ohm vrai} = 10^9 \text{ C.G.S.} = 106^{\text{cm}}, 25 \text{ de mercure.} \end{array} \right.$$

Valeurs de ν .

1°.....	299,23.10 ⁸
2°.....	299,20.10 ⁸
3°.....	299,13.10 ⁸

(¹) Un diaphragme, placé sur le miroir du pendule, était mal fixé : c'est ce qui a causé la variation de θ ; ce diaphragme est supprimé pour les séries suivantes.

SÉRIE II (28 avril 1892).

Mesures principales.

	n .	A.	A'.
		Ω	Ω
1°.....	20	240,47	4,30
2°.....	31	384,08	6,60
3°.....	37	465,36	7,95

$$\theta = 1^s, 03713, \quad \theta' = 1^s, 03718.$$

Mesures accessoires.

$$\begin{aligned} \log k &= 0,0191316, & t &= 13^{\circ}, 85, \\ G_1 &= 6024^{\Omega}, 1, & \log \frac{\Omega}{\text{ohm vrai}} &= 1,9996985, \\ G_2 &= 6766^{\Omega}, 1, & \frac{D+C}{C} &= 19979,3, \\ & & e &= 6997^{\mu}, 8. \end{aligned}$$

$$\text{Constantes..} \left\{ \begin{array}{l} B = 18975^{\Omega}, 2, \\ C = 500^{\Omega}, 8, \\ \text{ohm vrai} = 10^9 \text{ C. G. S.} = 106^{\text{cm}}, 25 \text{ de mercure.} \end{array} \right.$$

Valeurs de ν .

1°.....	299,18. 10 ⁸
2°.....	299,04. 10 ⁸
3°.....	299,24. 10 ⁸

SÉRIE III (30 avril 1892)

Mesures principales.

	<i>n.</i>	<i>A.</i>	<i>A'.</i>
		Ω	Ω
1°.....	34	422,93	7,41
2°.....	27	329,23	5,86
3°.....	18	214,43	3,85

$$\theta = 1^{\circ}, 03711, \quad \theta' = 1^{\circ}, 03715.$$

Mesures accessoires.

$$\begin{aligned} \log k &= 0,0191369, & t &= 13^{\circ}, 17, \\ \log \frac{\Omega}{\text{ohm vrai}} &= \bar{1}, 9996761, \\ G_1 &= 6008^{\Omega}, 4, & \frac{D+C}{C} &= 19977, 8. \\ G_2 &= 6748^{\Omega}, 2, & e &= 6998^{\mu}, 3. \end{aligned}$$

$$\text{Constantes..} \left\{ \begin{array}{l} B = 18975^{\Omega}, 2, \\ C = 500^{\Omega}, 8, \\ \text{ohm vrai} = 10^9 \text{ G. G. S.} = 106^{\text{cm}}, 25 \text{ de mercure.} \end{array} \right.$$

Valeurs de ν .

1°.....	299,29. 10 ⁸
2°.....	299,44. 10 ⁸
3°.....	299,35. 10 ⁸

SÉRIE IV (2 mai 1892).

Mesures principales.

	n .	A.	A'.
1°.....	31	386,18 ⁿ	7,01 ⁿ
2°.....	19	228,88	4,29
3°.....	17	203,84	3,91

$$\theta = 1^s, 03713, \quad \theta' = 1^s, 03707.$$

Mesures accessoires (¹).

$$\begin{aligned} \log k &= 0,0180414, & t &= 12^{\circ}, 98, \\ \log \frac{\Omega}{\text{ohm vrai}} &= 1,9995257, \\ G_1 &= 6073^{\Omega}, 4, & \frac{D+C}{C} &= 19981,8, \\ G_2 &= 6661^{\Omega}, 2, & e &= 6999^{\mu}, 4. \end{aligned}$$

$$\text{Constantes.} \left\{ \begin{aligned} B &= 18975^{\Omega}, 2, \\ C &= 500^{\Omega}, 8, \\ \text{ohm vrai} &= 10^9 \text{ C. G. S.} = 106^{\text{cm}}, 25 \text{ de mercure.} \end{aligned} \right.$$

Valeurs de ν .

1°.....	299,15. 10 ⁸
2°.....	299,40. 10 ⁸
3°.....	299,41. 10 ⁸

(¹) k , G_1 , G_2 diffèrent notablement des valeurs antérieures en raison des modifications subies par le galvanomètre.

SÉRIE V (21 mai 1892).

Mesures principales.

	<i>n.</i>	A.	A'.
1°.....	27	$\frac{\Omega}{277,81}$	$\frac{\Omega}{6,40}$
2°.....	26	$\frac{\Omega}{266,81}$	$\frac{\Omega}{6,07}$

$$\theta = 1^s, 03763, \quad \theta' = 1^s, 03752 \text{ (}^1\text{)}.$$

Mesures accessoires.

$$\begin{aligned} \log k &= 0,0182810, & t &= 16^s, 66, \\ \log \frac{\Omega}{\text{ohm vrai}} &= 0,0002216, \\ G_1 &= 6177^{\Omega}, 9, & \frac{D+C}{C} &= 19976,0, \\ G_2 &= 6776^{\Omega}, 1, & e &= 7004^{\mu}, 0. \end{aligned}$$

$$\text{Constantes.} \left\{ \begin{array}{l} B = 18975^{\Omega}, 2, \\ C = 500^{\Omega}, 8, \\ \text{ohm vrai} = 10^9 \text{ C. G. S.} = 106^{\text{cm}}, 25 \text{ de mercure.} \end{array} \right.$$

Valeurs de ν .

1°.....	299,06. 10 ⁸
2°.....	299,06. 10 ⁸

(¹) La longueur du pendule de l'horloge avait été changée.

Tableau général des déterminations de ν .

27 avril.....	{	299,23.10 ⁸	
		299,20 »	
		299,13 »	
28 avril.....	{	299,18 »	
		299,04 »	
		299,24 »	
30 avril.....	{	299,29 »	
		299,44 »	
		299,35 »	
2 mai.....	{	299,15 »	
		299,40 »	
		299,41 »	
21 mai.....	{	299,06 »	
		299,06 »	
Moyenne.....		299,2.10⁸	

RÉSUMÉ.

L'exposé de mes propres recherches sur la constante ν est précédé d'une étude historique sur les mesures antérieures.

Il semble résulter de la discussion des expériences que la valeur généralement admise pour ν ,

$$\nu = 3.10^{10} \text{ C. G. S.},$$

ne serait exacte qu'à quelques millièmes.

La plus grande difficulté est peut-être de connaître exactement la distance des armatures du condensateur employé, électromètre absolu ou condensateur proprement dit. Il y a lieu de craindre qu'il n'en ait souvent été fait qu'une évaluation trop faible conduisant à une valeur de ν trop forte. Un isolement imparfait, comme une décharge incomplète des condensateurs, conduisent aussi à

trouver un ν trop grand. L'influence du système de garde est parfois douteuse, à cause de son écartement sensible du collecteur.

J'ai employé un galvanomètre différentiel que traversent, d'une part, les décharges périodiques d'un condensateur, et, d'autre part, un courant dérivé fourni par la pile de charge.

Par l'emploi d'épais disques de glace travaillés en verres d'optique, puis argentés, j'ai constitué un condensateur plan à anneau de garde dont la capacité peut être calculée avec une grande précision. La distance des armatures est mesurée par un procédé optique sur l'appareil prêt à fonctionner.

La méthode stroboscopique permet de donner au commutateur, mû par une machine Gramme de 1 cheval, une rotation très régulière. Tout le circuit est isolé avec soin en évitant les courants thermo-électriques.

Toutes les mesures, enfin, sont rapportées aux étalons C.G.S. : les résistances sont comparées, à chaque expérience, avec un ohm étalon ; les longueurs sont mesurées avec une machine à diviser étalonnée ; les durées sont comparées à la seconde d'une horloge astronomique réglée sur l'Observatoire de Paris.

Les expériences définitives, très concordantes, ont été faites en modifiant successivement toutes les parties de l'appareil ; elles conduisent à la valeur moyenne

$$\nu = 299,2 \cdot 10^8 \frac{\text{centimètre}}{\text{seconde}}.$$

Cette valeur me paraît devoir être exacte au $\frac{1}{1000}$.

Ces recherches ont été faites au laboratoire de Physique de l'École Normale supérieure. MM. Violle et Brillouin,

Maîtres de Conférences à l'École, ont mis très obligeamment à ma disposition toutes les ressources du laboratoire. Ils me permettront d'exprimer ici ma sincère reconnaissance pour les bienveillants conseils que j'ai reçus d'eux pendant l'exécution de ce travail.

Vu et approuvé :

Paris, le 15 juin 1892.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 16 juin 1891.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Osmose. — Application à l'étude des dissolutions.

Vu et approuvé :

Paris, le 15 juin 1892.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 16 juin 1891.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
GRÉARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,

18576.

Quai des Grands-Augustins, 55.
